修士論文
荷電粒子バックグラウンドの除去効率を飛躍的に高めたＸ線CCD検出器の開発

東京工業大学大学院　理工学研究科　基礎物理学専攻
堂谷研究室
岩井　將親

平成25年2月12日

要旨

本論文は二部構成になっている。

第一部では、新しい CCD の試験・評価を行うためのシステムを構築した。

本システムは、CCD の駆動に必要な信号を生成する駆動系、CCD 出力の信号処理を行う信号処理系、および両者を制御する制御系から構成されるエレクトロニクス部と CCD の動作環境を作り出す真空系および冷却系から構成される周辺部から成る。システムをグラウンド系統図に従って構築し、冷却した CCD に ^{55}Fe からの X 線を照射したフレームイメージを数時間にわたって安定的に取得した。この得られたフレームイメージを用いてシステムの性能評価を行うと、読み出しノイズが 7e-、暗電流が 0.16e-/4pixel/4s となることが分かった。この結果、システムの低雑音性および十分な冷却性能を持っていることを示すことができた。

第二部では、荷電粒子バックグラウンドの除去効率を高めた 2-layer CCD の開発および概念実証試験を行った。

X 線 CCD 検出器は、X 線望遠鏡の焦点面検出器として広く使われており、今後はエネルギー帯の広さから空乏層の厚い背面照射型 CCD（BI-CCD）が主流になると考えられる。CCD を含む X 線 CCD 検出器は、X 線だけでなく荷電粒子にも高い感度を持っている。荷電粒子による BI-CCD のバックグラウンドイベントの強度はエネルギーにほとんどよらないフラットなスペクトルを示すのに対し、一般に観測天体からの X 線フラックスはエネルギーが高くなるほど小さくなる。そのため、高エネルギー側ではバックグラウンドの割合が高くなり、検出器の感度を上げるにはバックグラウンドを効率良く除去することが極めて重要になる。また、BI-CCD は中性領域が存在しないため、電荷の広がりを利用した従来のバックグラウンド除去法は効率が低い。

本研究では、二枚の CCD を二層構造に配置し、三次元的に荷電粒子の飛跡を追うことでバックグラウンドの除去効率を高めた X 線 CCD 検出器（2-layer CCD）を製作した。2-layer CCD は既存の BI-CCD を背面同士で貼り合わせ、共通のクロックで駆動させるようにした。既存のシステムを用いて 2-layer CCD に模擬バックグラウンドとしてベータ線を照射したフレームイメージを取得した。この結果、二層同時にベータ線を検出することはできたが、素子間の相関がわかりにくくベータ線毎に対応付けをすることができなかった。　最後に、ベータ線を照射したフレームイメージの議論から今後の課題について考察した。

Abstract

This report consists of two parts: (1) the construction of newly developed CCD test and evaluation system and (2) the development of a CCD detector system that can eliminate the output due to incident charged particle background events.

In the first part, we develop the electronics system that drives the CCD device, readouts and ADC the device output and the controller. At the same time, we develop the CCD cooling system with a vacuum chamber which is necessary to avoid the dew condensation and irradiate the device with low energy X-ray. The developed system succeeds in driving the device and acquiring the data of ^{55}Fe X-ray irradiated image continuously over several hours with keeping the device cold enough to suppress the dark current efficiently. The system noise is 7 e^- r.m.s. and the test device's dark current of 0.16 e^-/4pixel/4sec can be easily measured, which satisfy the requirements as the CCD test and evaluation system.

In the second part, we build a two-layer CCD sensor of 2 mm gap by accumulating two commercially-available DIP package CCD devices with back-to-back configuration, in order to test the spatially anti-coincidence method for low timing resolution position sensor. We test the sensor with the system developed in the first part of this report. With irradiating the newly developed sensor with the ^{90}Sr 2.2 MeV beta line, we show that the hidden-side chip works as the position sensor for the charged particles penetrating the incident-side chip. This suggests that the spatially anti-coincidence system works with closer gap two-layer sensors.

目 次

図 目 次

表 目 次

第1章　X線天文学とX線検出器

X 線天文学は、1962 年の B. Rossi、R. Giacconi らによるロケット実験により、全天で最も明るい X 線源である Sco X-1 が発見されたことに始まる [1]。X 線天文学の発展は X 線検出器の進歩に支えられてきた。ここでは、X 線天文学の概要と X 線検出器について述べる。

1.1　X線天文学

地球大気は X 線を透過しないので (図 1.1)、天体からの X 線を観測するためには気球、ロケット、人工衛星などの飛翔体を用いて大気圏外に X 線検出器を持ち出す必要がある。最初の本格的な X 線天文衛星であった 1970 年の Uhuru 衛星以来、人工衛星を用いた X 線天体の観測が数多く行なわれてきた [2]。

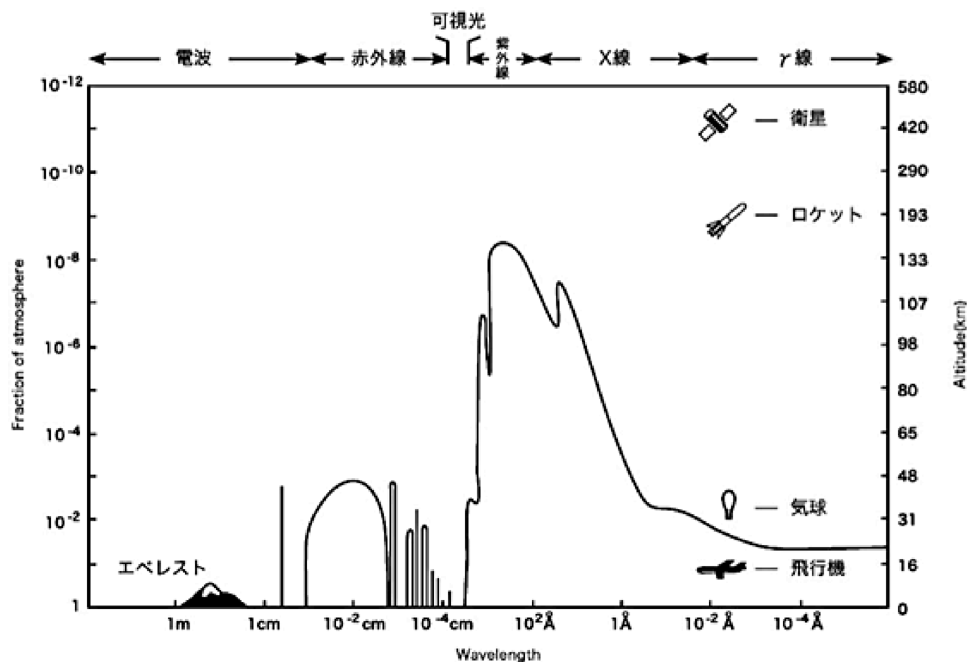


図 1.1: 各電磁波の波長と大気の透過率（大気圏外からやってくる電磁波の到達高度）の関係。波長が $\sim 10^2 - 10^{-1}$ Å（$\sim 10^{-2} - 10$ nm）の電磁波が X 線である。[3]

1.1.1　X 線

宇宙観測の分野では、エネルギーが $E = 0.1 - 100$ keV ($< m_e c^2 = 511$ keV : 電子の静止エネルギー) 程度の電磁波を X 線と呼ぶことが多い。波長に換算すると、$\sim 10^{-2} - 10$ nm の電磁波が X 線とよばれ、さらに短い波長では γ 線と呼ばれる。

エネルギー E、波長 λ、温度 T の関係式は

$$E/\mathrm{keV} = \frac{1.24}{\lambda/\mathrm{nm}} \tag{1.1}$$

$$E/\mathrm{eV} = k_\mathrm{B} T/\mathrm{K} \tag{1.2}$$

と表される。ここで、$k_\mathrm{B} = 8.62 \times 10^{-5}$ eV/K はボルツマン定数である。

1.1.2　X 線の放射機構

X 線を放射する天体の種類は多岐に及ぶが、その放射機構は大きく二つに分類することができる。熱平衡にある物質からの放射 (熱的放射) と、熱平衡にない物質からの放射 (非熱的放射) である。

- 熱的放射
  熱的放射には、放射体の温度に応じて特に強い放射をしたり急激に強度が変化する特徴的な波長帯が存在する。X 線領域で強い放射をするのは 10^{7-9} K 程度の超高温物質である。熱的な X 線スペクトルをみせる天体は光学的に薄い高温プラズマと光学的に厚い物質に分けられる。光学的に薄い高温プラズマは、熱制動放射による連続成分とプラズマ内のイオン化した元素からの輝線で特徴づけられる強い X 線を放射する。光学的に厚い物質からの放射は黒体放射で表すことができ、具体的には連星系をなすブラックホールや中性子星のまわりに形成される降着円盤、あるいは中性子星表面からの X 線放射がある。スペクトルには周囲のプラズマ内のイオン化した元素からの輝線や吸収端が見られることがあり、存在する元素の種類やイオン化状態、プラズマの温度などの様々な情報を得ることができる。

- 非熱的放射
  非熱的な放射は、一般的には特徴的な波長帯を持たず、輝線・吸収端といった構造もない。非熱的な X 線を放射するには、熱以外の電子の加速機構が必要である。代表的なものとしてシンクロトロン放射と逆コンプトン散乱がある。シンクロトロン放射は、相対論的な電子が磁場中で加速度運動することによる放射である。逆コンプトン散乱は高速で運動する電子が光子に衝突し、光子のエネルギーをたたきあげる現象である。これらの現象は、高エネルギー電子のエネルギースペクトルがベキ関数で表される場合、放射のスペクトルもベキ関数で表される。

1.1.3　これまでの X 線天文学

これまでの X 線観測によって、さまざまな発見がもたらされた。ここでは主な観測対象についてその概要を述べる。

- 銀河系中心
  銀河系の中心部には星や物質が密集し、中心核には太陽の 300 万倍もの重さを持つ巨大ブラックホールが潜んでいると考えられている。中心領域は 1000 万度にも達する超高温プラズマ雲に覆われ、また、中心から約 300 光年離れた低温ガス雲から鉄輝線が見つかった。これらは過去に中心の巨大ブラックホールに大量のガスが吸い込まれる際に放出された膨大な X 線放射の名残である可能性が高い。

- 超新星残骸
  質量が太陽の約 8 倍以上あるような大きな星は、その進化の果てに超新星爆発を起こす。あるいは、連星系中の白色矮星は、質量降着によりチャンドラセカール限界を超えると超新星爆発を起こす。これらの痕跡は何万年にも渡って残り、超新星残骸と呼ばれる。宇宙の化学的進化はほとんどが恒星の中での核反応で行われ、重元素は超新星爆発を通して宇宙空間に放出される。超新星残骸の研究によって宇宙の化学的な進化を調べることができる。

- X 線連星
  X 線連星は、中性子星やブラックホールを含む近接連星系で、質量降着により X 線を放射する。主星（伴星）性質により、ブラックホール連星、低質量 X 線連星、X 線パルサーなどに分類される。

  ブラックホール連星は、ブラックホールと恒星からなる近接連星系である。ブラックホールは単独では輝かないので、質量降着に伴って放射される X 線を観測することでブラックホールとその近傍の物理状態を知ることができる。一般的に、ブラックホール連星からの X 線は、ミリ秒から数時間の広いタイムスケールで、強いランダムな変動を示すことがわかっている [4]。

  低質量 X 線連星（LMXB）は、弱磁場中性子星と太陽質量以下の低質量星からなる近接連星系である。降着物を磁極付近に集めることが困難なため、X 線パルサーになりにくい。X 線パルスがあってもその振幅は小さく、検出は難しいとされていたが、最近の検出器の感度、時間分解能の向上により、ミリ秒周期の X 線パルスをもつ LMXB がいくつか見つかっている。

  X 線 (連星) パルサーは、強磁場中性子星と通常の星からなる近接連星系である。伴星からの降着ガスが磁力線に沿って磁極に落ちこみ加熱され、高温となった磁極から X 線が放射されている。中性子星の磁極が傾いていると、中性子星の自転により磁極が見え隠れするため、X 線放射がパルスとして観測される。中性子星からの X 線パルスをうまく使うことで、連星系内のガスがどのような物理状態にあるのかを探ることができる。

- 銀河・銀河団
  銀河の集団である銀河団は、温度が数千万度に達する高温ガスで満たされ、X 線で明るく輝いている。高温ガス中の重元素の量と分布を調べることによって、これまでどのような星が生まれて死んでいったのか、さらには銀河・銀河団がどのように進化してきたのかを知ることができる。

- 活動銀河核 (Activi Galactic Nuclei: AGN)
  銀河の中心が、銀河にある全ての星の明るさを足し合わせたよりも明るく輝く銀河が存在する。このような銀河の中心核を活動銀河核と呼ぶ。AGN の中には、相対論的なジェットを吹き出しているものもある。中心エネルギーに対して非対称に大きく広がった鉄輝線や電離ガスによる吸収構造等を示すスペクトル、X 線強度の時間変動が観測され、巨大なブラックホールが潜んでいると考えられている。

- 宇宙 X 線背景放射 (Cosmic X-ray Background: CXB)
  CXB は宇宙のどの方向からもほぼ等方的にやってくる微弱な X 線のことで、その起源は X 線天文学始まって以来の謎である。現在は、宇宙全体に存在する AGN からの X 線放射の重ね合わせとして理解されている。CXB はそれ自身が観測の対象となることもあるが、点源を観測するときにはバックグラウンドとなる。

1.1.4　今後の X 線天文学

宇宙で主に熱的放射をする天体からの X 線はもっぱら十数 keV 以下でみられることが多く、10 - 20 keV 以上では非熱的放射が卓越する。これまでの観測で、銀河団や超新星残骸などから非熱的な成分が見つかっており、宇宙線の加速の現場ではないかと指摘されている。

宇宙において、高エネルギー粒子や高エネルギー光子は、数は少ないものの、持っている総エネルギー (個数 $\times$ 個々のエネルギー) は宇宙全体のエネルギーの無視できない割合を占める。宇宙の全エネルギーがどのように、またどのような物理法則によって分配されているのかを理解することは、宇宙の根本的な問題と言える。将来計画において、非熱的放射が卓越する 10 keV 以上の高エネルギー領域で X 線スペクトルと強度分布を高精度で観測し、非熱的粒子の生成機構を明らかにすることが期待される。

1.2　X 線検出器

1.2.1　X 線と物質の相互作用

X 線や γ 線、すなわち高エネルギーの電磁波が物質に入射すると、光電吸収、Compton 散乱、電子対生成によって高速電子を生み出す。一般的にはこれらの相互作用を利用して X 線を検出する。ここでは X 線・γ 線の物質との相互作用の諸過程について説明する。

1.2.1.1　相互作用の諸過程

1. 光電吸収
   光子が物質の原子によって吸収されるのは、原子核に束縛された電子によるものであって、自由電子による吸収は起こらない。すなわち、エネルギーと運動量の保存則が成立するためには、運動量のやりとりするための第三の物体 (原子核) が存在し

なければならない。入射光子のエネルギーを E_γ とすると、放出される電子 (光電子) のエネルギー E_e は

$$E_e = E_\gamma - E_b \tag{1.3}$$

である。ここで、E_b は K, L, M, $\cdots$ 殻の結合エネルギーである。K 殻の結合エネルギーよりも大きなエネルギーを持つ光子に対しては、80 %以上が K 殻電子によるものとなる。

光電子放出の結果として殻にできた空孔は自由電子の捕獲や原子内の他の殻の電子の再配列によって直ちに満たされる。初期状態と最終状態のエネルギー差は Auger 電子または特性 X 線の放射によって解放される。

- Auger 電子
  光電子放出などによって通常満たされているはずの殻の一部が空になると、原子の励起エネルギー（内殻 - 外殻のエネルギー差）が直接外殻電子 1 個に付与され、その電子が原子から放出されることがある。この電子を Auger 電子という。
- 特性 X 線
  励起状態から基底状態へ遷移するときに放射される X 線を特性 X 線と呼び、そのエネルギーは初期状態と最終状態エネルギーの差になる。もし K 殻に 1 個の空孔が一時的にできたとすると、その後この空孔が埋められる際に K 系列の特性 X 線が放射される。空孔を埋める電子が L 殻から来る場合には、K 殻と L 殻のエネルギー差に等しいエネルギーを持つ K_α 線が放射される。M 殻から電子が来る場合には、よりエネルギーの大きな K_β 線が放射される。K 殻の空孔を埋めた電子を供給したために生じる外側の殻の空孔はさらに外側の電子によって次々に満たされて、順次 L, M, $\cdots$ 系列の特性 X 線を放射する。

励起原子が特性 X 線を放射して遷移する割合を蛍光収率 (fluorescence yield) といい、原子番号 Z に依存する (図 1.2)。シリコン ($Z = 14$) の場合、蛍光収率は 5 %程度となる。

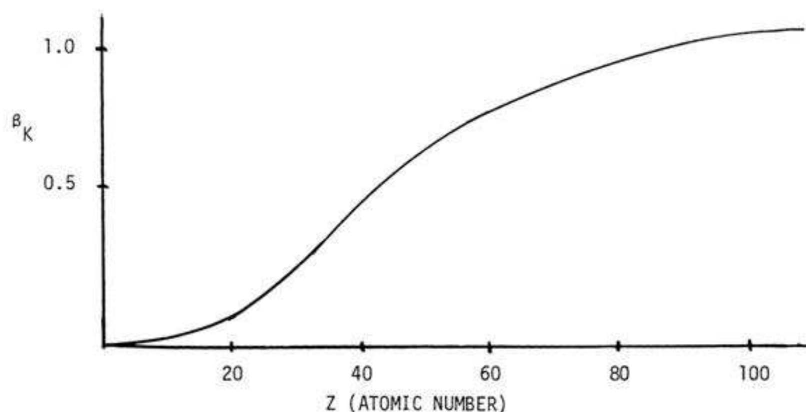


図 1.2: 原子番号 Z と蛍光収率 β_K の関係

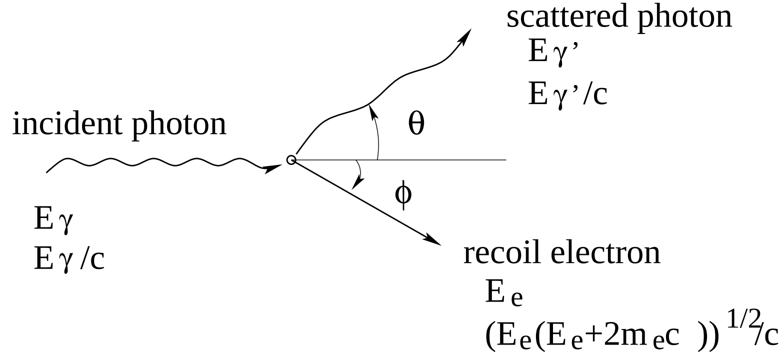


図 1.3: Compton 散乱

2. Compton 散乱

自由電子によって光子が散乱される場合、あるいは光子のエネルギーが電子の結合エネルギーに比較して十分大きくなって、電子を自由電子とみなすことができるようになると、光子は電子により非弾性散乱を受ける。この場合の散乱光子のエネルギーは、運動学的な関係式から次式で与えられる。

$$E_{\gamma'} = \frac{E_\gamma}{1+\alpha\,(1-\cos\theta)} \tag{1.4}$$

ここで、$\alpha = E_\gamma/m_e c^2$, θ は光子の散乱角である。反跳電子のエネルギー E_e は、飛び出す角度を ϕ として、式 (1.5) となる。

$$\begin{aligned} E_e &= E_\gamma - E_{\gamma'} \\ &= E_\gamma \frac{2\alpha\cos^2\phi}{(1+\alpha)^2 - \alpha^2\cos^2\phi} \\ &= E_\gamma \frac{\alpha(1-\cos\theta)}{1+\alpha(1-\cos\theta)} \end{aligned} \tag{1.5}$$

Compton 散乱の断面積は光子のエネルギーが低くなると Thomson 散乱断面積に一致する。また、エネルギーが高くなると徐々に減少はするが（クライン - 仁科の公式)、その変化は少ない。後方 ($\theta = 2\pi$) に散乱されたとき散乱光子のエネルギーは最小となって

$$E_{\gamma',\mathrm{min}} = \frac{E_\gamma}{1+2\alpha} \tag{1.6}$$

であり、このとき反跳電子のエネルギーは最大となって

$$E_{e,\mathrm{max}} = E_\gamma \frac{2\alpha}{1+2\alpha} \tag{1.7}$$

となる。図 1.4 に、θ をパラメータとした散乱前後の光子のエネルギーの関係と、ϕ をパラメータとした入射光子と反跳電子のエネルギーの関係を示す。

3. 電子対生成

光子のエネルギーが電子の静止質量エネルギー $m_e c^2$ の 2 倍を越えると、原子核の

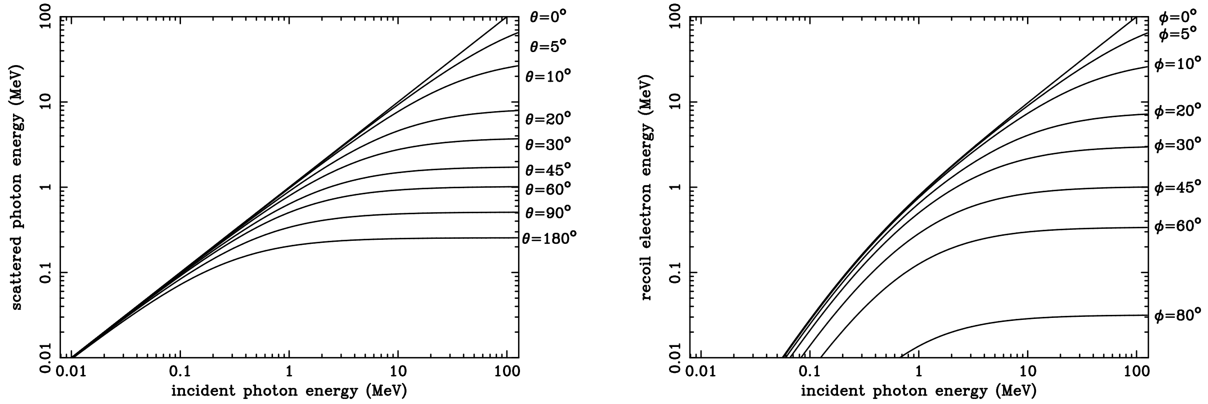


図 1.4: Compton 散乱における入射光子エネルギーと散乱光子 (左)、反跳電子 (右) のエネルギーの関係。散乱光子に関しては散乱角 θ、反跳電子に関しては放出された角度 ϕ をパラメータとして示してある。

電場内で電子陽電子対が生成されて光子が完全吸収される過程が起こる。原子核があるためにエネルギーと運動量の保存則を満たして光子は吸収される。対生成が起こると、現象的には $E_{\gamma'} = m_e c^2$ のエネルギーを持った 2 個の光子 (3 個もあり得る) がほぼ相対する方向に放出されるが、これは対生成過程でできた陽電子が物質中の電子と結合して消滅することによって生じたもので、この γ 線を消滅放射 (annihilation radiation) という。対生成によって生じた電子、陽電子の運動エネルギーを E_-, E_+ とすると、次の関係が成立する。

$$E_- + E_+ = E_\gamma - 2m_e c^2 \tag{1.8}$$

対生成は電子の電場内でも起こるが、この場合にはエネルギーが軌道電子に受け渡されて飛び出すため、三電子生成となる。この過程の閾値は $4m_e c^2$ である。三電子生成は基本的には対生成と同じであるが、その断面積は原子核の電場の中での対生成に比べてかなり小さい。

1.2.1.2 X 線の減衰

1.2.1.1 項の 3 つの過程に関する原子 1 個あたりの断面積を、それぞれ $\sigma_{\mathrm{photo}}, \sigma_{\mathrm{comp}}, \sigma_{\mathrm{pair}}$ とし、その物質の質量数を A、密度を ρ、Avogadro 数を N_a とする。単位体積中の原子数は $\rho N_a A^{-1}$ で与えられ、断面積と単位体積中の原子数の積は cm^{-1} の次元を持つ。これを線減衰係数と呼ぶ。すなわち、光電吸収、Compton 散乱、電子対生成の線減衰係数は

$$\tau = \left(\frac{\rho N_a}{A}\right)\sigma_{\mathrm{photo}}, \quad \sigma = \left(\frac{\rho N_a}{A}\right)\sigma_{\mathrm{comp}}, \quad \kappa = \left(\frac{\rho N_a}{A}\right)\sigma_{\mathrm{pair}} \tag{1.9}$$

と書くことができる。

このような線減衰係数を用いると、強度 I_0 の X 線が厚さ x の物質層を通過した後の強度 I は、$\mu = \tau + \sigma + \kappa$ として、

$$I = I_0 e^{-\mu x} \tag{1.10}$$

で表される。X 線が物質中で相互作用を起こさないで透過する平均距離 λ は次式のように線減衰係数の逆数となる。λ を X 線の減衰長 (Attenuation Length) と呼ぶ。

$$\lambda = \frac{\int_0^\infty xe^{-\mu x}dx}{\int_0^\infty e^{-\mu x}dx} = \frac{1}{\mu} \tag{1.11}$$

また、線減衰係数は密度 ρ に比例している。そこで、μ を ρ で割った値 μ_m を定義する。

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \tag{1.12}$$

μ_m は質量減衰係数と呼ばれ、物質層の厚さを g cm^{-2} で表す場合に使用される。与えられた X 線エネルギーに対し、質量減衰係数の値は吸収物質の物理的状態によって変化しない。例えば水の場合、液体であっても蒸気であってもこの値は同じである。

シリコンに対する 1 keV – 1 MeV での X 線の各相互作用の断面積 (質量減衰係数) を図 1.5 に示す。X 線天文学において通常観測する X 線のエネルギーは数 100 eV から 10 keV 程度であり、相互作用としては光電吸収が支配的である。

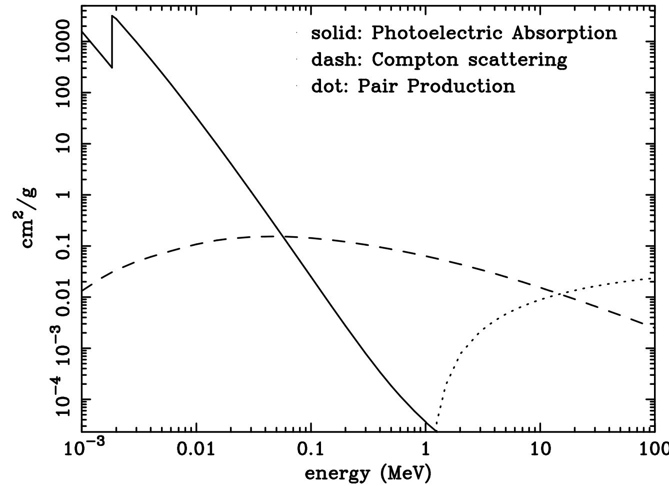


図 1.5: シリコンに対する X 線の各相互作用の断面積。通常観測する X 線領域 (数 100 eV – 10 keV 程度) では光電吸収が支配的となる [5]。

1.2.2　荷電粒子と物質の相互作用

1.2.1 節に挙げたような X 線と物質の相互作用によって高速電子が生成される。多くの検出器は、この電子を検出することによって間接的に X 線を検出する。そのため、X 線検出器の理解には電子と物質の相互作用の理解が不可欠であるが、これは荷電重粒子 (陽子やイオン) の場合に比べて定量的な取り扱いが難しい。そこで、まず荷電重粒子と物質の相互作用について述べた後、電子と物質の相互作用について述べる ([7]、[8]、[9])。

1.2.2.1 荷電重粒子の相互作用

荷電粒子は吸収物質に入射すると直ちに多数の電子と相互作用を起こす。このような荷電粒子が接近した場合、電子は荷電粒子のクーロン相互作用によって衝撃を受ける。荷電粒子との接近の度合に依存して、この衝撃力は吸収物質原子内の電子をより高いエネルギー準位に励起したり電子を原子から完全に取り去って電離したりする。荷電粒子は電子へ伝達された分だけエネルギーを失うので、その結果荷電粒子は減速する。1 回の衝突で失うエネルギーは粒子のも持つ全エネルギーに比べてごくわずかなので、入射粒子がエネルギーを失うまでにこのような衝突を多数回繰り返す。どの瞬間においても粒子は多数の電子と相互作用をしており、その結果粒子は連続的に減速して最後に停止する。

減速過程における荷電重粒子の飛跡は、終端部をのぞくと直線状である。このことは粒子はどの衝突においても大きくは曲げられず、また相互作用が全ての方向に同時に起こっていることを示している。従って荷電粒子は吸収物質中で一定の飛程を示すことになる。

阻止能

与えられた粒子に対する物質の阻止能 S は、その物質中における飛跡の単位長さ当たりのエネルギー損失で定義される。

$$S = -\frac{dE}{dx} \tag{1.13}$$

荷電重粒子に対する阻止能は、極低エネルギー領域を除いて、一般的には Bethe によって計算された公式に相対論的速度領域における補正や吸収物質の構成原子に対する内殻補正を加えた次式によって与えられている。

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_e v^2} NB, \tag{1.14}$$
$$B \equiv Z\left[\ln\left(\frac{2m_e v^2}{I}\right) - \ln\left(1-\beta^2\right) - \beta^2 - \frac{C}{Z} - \frac{1}{2}\delta\right]$$

ただし、

E : 荷電重粒子の運動エネルギー
v : 荷電重粒子の速度
ze : 荷電重粒子の電荷
m_e : 電子の静止質量
e : 電子の電荷
N : 単位体積中の吸収物質原子の個数
Z : 吸収物質原子の原子番号
I : 吸収物質原子の平均の励起ポテンシャル
C : 内殻補正
δ : 密度効果の補正

である。以下に式 (1.14) の特徴をまとめる。また、陽子のエネルギーに対する鉛とアルミニウムの阻止能を図 1.6 に示す。

- $-\frac{dE}{dx} \propto \frac{1}{v^2}$
  速度が遅くなると荷電粒子は電子の近くで長い時間を過ごすことになるので電子が受け取る衝撃力が大きくなる。
- $-\frac{dE}{dx} \propto z^2$
  速度の等しい異種荷電粒子は、電荷の大きい方がエネルギー損失は大きくなる。
- $-\frac{dE}{dx} \propto NZ$
  原子番号が大きく原子数密度の高い物質が大きな阻止能を示す。
- 高エネルギー領域で密度効果が効く。粒子のエネルギーが高くなると、粒子に付随する電場が進行方向とは垂直の方向に延びていく。この相対論的効果はエネルギー損失の増加をもたらすはずであるが、実際は周囲の原子の偏極効果により垂直方向に延びた電場が遮蔽されてエネルギー損失が小さくなる[1]。
- 低エネルギー領域で内殻補正が効く。内殻補正は入射粒子に付随する電場が原子の内殻には作用しないため、エネルギー損失が小さくなる効果である。

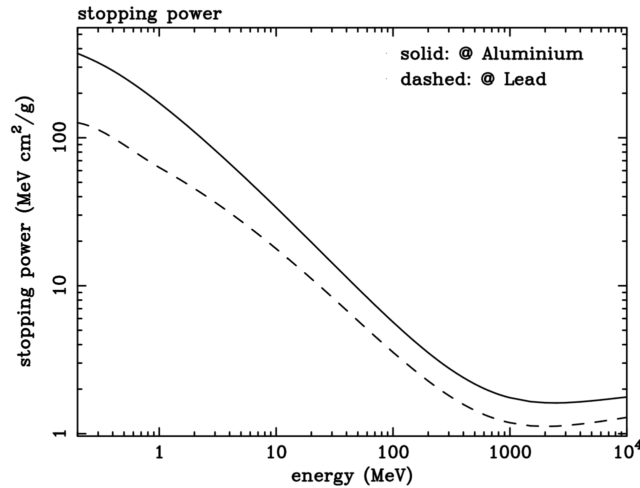


図 1.6: 陽子のエネルギーと鉛、アルミニウムの阻止能の関係。縦軸は阻止能を密度で割った値で示してある [6]。

飛程

あるエネルギーをもった荷電粒子が物質に入射すると、先に述べたような割合でエネルギーを失い、遂には静止する。このように入射粒子が完全に静止するまでに物質中を走る距離を飛程という。飛程は粒子がそれ以上は透過しない距離を表している。

[1]偏極効果は物質を構成する原子の密度に直接依存するため、密度効果と呼ばれる。

荷電重粒子の飛程は、その直進性を仮定して粒子の阻止物質に対するエネルギー損失から次式で与えられる。

$$R(E) = \int_0^E \frac{dE}{-dE/dx} \tag{1.15}$$

鉛とアルミニウムに対する陽子のエネルギーと飛程の関係を図 1.7 に示す。

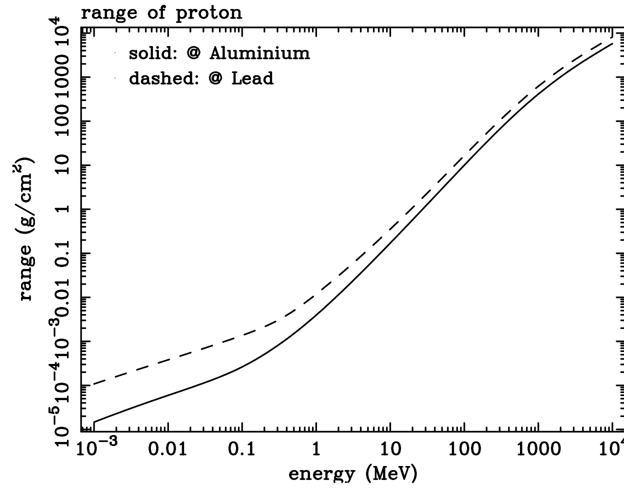


図 1.7: 鉛とアルミニウムに対する陽子のエネルギーと飛程の関係 [6]。

1.2.2.2　電子の相互作用

高速電子の電離、励起作用によるエネルギー損失も、若干の差を除けば重荷電粒子の場合とほぼ同様に取り扱うことができる。高速電子の場合にはその衝突の対象が同種の電子であるという点で荷電重粒子の場合とは異なってくる。たとえば、高速電子との電離衝突の際に飛び出す 2 個の電子のうち、いずれが入射粒子であるかは本質的に区別することはできない。

阻止能

式 (1.14) と類似の高速電子に対する電離および励起による阻止能を示す式が Bethe によって導かれている。

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi e^4 NZ}{m_e c^2 \beta^2}\left[\ln\left(\frac{mc^2\beta^2 E}{2I^2(1-\beta^2)}\right) - \left(2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2\right)\ln 2 + \left(1-\beta^2\right) + \frac{1}{8}\left(1-\sqrt{1-\beta^2}\right)^2\right] \tag{1.16}$$

一方、電子が原子核の近傍を通過するようになると、電子は核の影響を受けて曲げられ、電磁波を放射してエネルギーを失う (制動放射)。これに起因するエネルギー損失を

放射損失という。

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\rm rad} = \frac{4NEZ\,(Z+1)\,e^4}{137{m_e}^2c^4}\ln\left(\frac{2E}{m_ec^2}-\frac{1}{3}\right) \tag{1.17}$$

この式からわかるように、放射損失は入射粒子の質量の 2 乗に逆比例しているため、荷電重粒子に対してはその寄与は極めて小さく、ほとんど無視できる。また、放射損失は電子のエネルギーが高いほど、また吸収物質の原子番号が大きいほど重要になる。電離損失は相対論的領域ではその増加はエネルギーに対して対数的にしか増えないので、エネルギーの増加とともにやがては放射損失が電離損失を超え、エネルギー損失の大部分を占めるようになる。放射損失は吸収物質の Z の 2 乗に、電離損失は Z の 1 乗に比例するため、互いのエネルギー損失が等しくなるエネルギー E_c は Z に依存する。放射損失と電離損失との比をとると、

$$\frac{(dE/dx)_{\rm rad}}{(dE/dx)_{\rm ion}} \simeq \frac{(E/{\rm MeV})Z}{1600(m_ec^2/{\rm MeV})} \simeq \frac{(E/{\rm MeV})Z}{800} \tag{1.18}$$

となる。

飛程

電子の場合、荷電重粒子とは異なり、1 回の衝突で大幅なエネルギーを失うこともある。進行方向の変化も著しく、高エネルギー領域を除き曲がりくねった経路をとる。そのため、電子に対する飛程の概念は荷電重粒子に対するものほどはっきりしていない。シリコンと金に対する電子のエネルギーと飛程の関係を図 1.8 に示す。数 keV - 数 10 keV の領域では、シリコンに対する電子 (エネルギー E_e) の飛程は $(E_e/\mathrm{keV})^{1.75}$ に比例することが知られている。

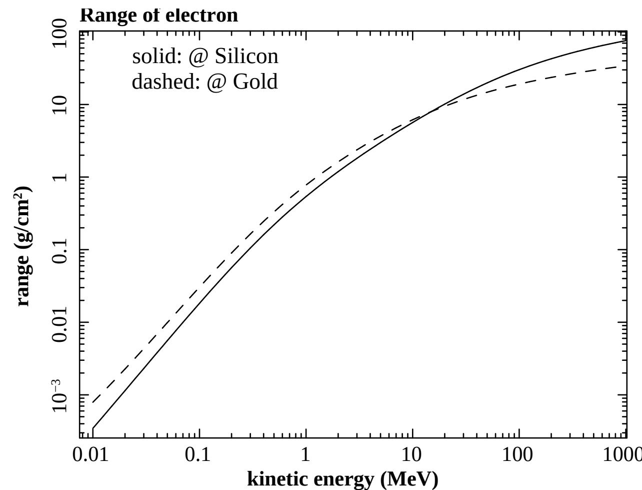


図 1.8: シリコンと金に対する電子のエネルギーと飛程の関係 [6]。

1.2.3　X 線検出器

本節では、宇宙観測に用いられる X 線検出器について、その概要を説明する。X 線検出器は、1.2.1 節で述べた X 線と物質の相互作用、特に光電効果を用いたものが多いが、全く異なる原理を用いたものもある。

1.2.3.1　比例計数管

比例計数管は、陰極をなす管と陽極をなす細い中心線 (芯線) との間に高電圧をかけ、その間に PR ガス等のガス (希ガスを主成分とする) を封入または連続的に流せるようにしたものである。入射 X 線が比例計数管内のガスに光電吸収され、そのエネルギーに比例した数の一次電子群を作る。この一次電子群が電極に移動する間に高電場によって加速され、まわりのガスを電離して二次電子群を作る (ガス増幅)。 一次電子群の数に比例した数の二次電子群を形成する範囲に電場を調節することにより、二次電子群を検出して X 線のエネルギーを知ることができる。比例計数管のエネルギー分解能は、1 次電子数の揺らぎとガス増幅過程のゆらぎで決まり、6 keV で半値全幅（FWHM）が 1 keV くらいとなる。特徴としては、構造が簡単なため大容積化して有効面積を上げやすいことが挙げられる。また、時間分解能は一般的に信号処理の時間で決まり、数 μsec である。抵抗線芯線を用いたり多芯線型にすることにより、1 mm 弱程度の位置分解能を持たせることもできる。

比例計数管は様々な観測に対応できるため、「Uhuru(米：1970)」、「Einstein (米：1978)」、「ぎんが (日：1987)」、「ROSAT (独：1990)」、「RXTE(米：1995)」など、様々な衛星に搭載された。

1.2.3.2　蛍光比例計数管

蛍光比例計数管は比例計数管のもつエネルギー分解能を改善するために発明された検出器であり、宇宙観測用ではてんま衛星で初めて実用化された。比例計数管では入射 X 線光子が作る 1 次電子の数をガス中で増幅させるが、蛍光比例計数管ではゼノンガス中に約 7000 V の電圧をかけて並行電場を作り、電子を加速させてガス中で蛍光（紫外線光子の放射）を起こさせ、その光を光電子増倍管で捉えて増幅して信号として取り出す。エネルギー分解能は基本的に一次電子数の揺らぎで決まり、比例計数管よりも 2 倍程度良いエネルギー分解能を得ている。「あすか」に搭載されたガス蛍光比例計数管 GIS は、位置検出型の光電子増倍管を採用することで撮像能力を持つ。

搭載衛星は、「てんま (日：1983)」、「EXOSAT（欧州：1983）」「あすか (日：1993)」、「BeppoSAX (伊：1996)」などである。

1.2.3.3　シンチレーション検出器

入射 X 線が NaI や CsI などのシンチレータ結晶を励起して発生させるシンチレーション光を光電子増倍管などによって検出する。重い元素の結晶を用い、さらに結晶を大き

くすることによって硬 X 線やガンマ線などの高エネルギー光子も検出することができる。時間分解能は蛍光の減衰時間で決まり数 nsec である。エネルギー分解能はシンチレータ中での発光量、集光効率、光電子増倍管での変換効率や増幅率の揺らぎでなど決まり、軟 X 線領域では一般に比例計数管より悪くなる。主に硬 X 線・γ 線観測で使われる。

搭載衛星は、「RXTE (米：1995)」、「すざく (日：2005)」などである。

1.2.3.4　半導体検出器

半導体検出器はシリコンやゲルマニウムなどの半導体を用いた検出器であり、固体検出器 (solid state detector: SSD) と呼ばれることもある（なお、CCD については次節で説明する）。p 型半導体と n 型半導体を p-n 接合させて逆バイアス電圧をかけ、電荷（キャリア）のない空乏層を形成し、そこで X 線を検出する。入射 X 線が空乏層で吸収されると、X 線のエネルギーに比例した数の電子正孔対が作られる。この電子、あるいは正孔の数を測定することで、X 線のエネルギーが測定できる。比例計数管のようなガス検出器に比べ X 線によって作られる電荷の量が約 10 倍も多いので、必ずしも二次電子増幅する必要はない。そのため、統計的ゆらぎも少くなるので、半導体検出器のエネルギー分解能はガス検出器に比べて各段に良い。実際には、半導体検出器のエネルギー分解能は、その漏曳電流（リーク電流）や電気容量によって決まる読み出し電子回路の雑音レベルに支配される。また、p 型と n 型の間に真性半導体 (超高純度シリコン、i 層) を挟むことによって空乏層を厚くし、硬 X 線 ($\gtrsim$ 10 keV) も検出できるようにした PIN 型半導体検出器や、高い阻止能を持つテルル化カドミウム (CdTe) をピクセル化することによって硬 X 線・γ 線の撮像を可能にした CdTe 検出器がある。

半導体検出器は「Einstein」に搭載され、PIN 型検出器は「すざく」に搭載されている。

1.2.3.5　X 線 CCD 検出器

X 線 CCD（Charge Coupled Device：電荷結合素子）は、小型化した半導体検出器（SSD）の電極を 2 次元モザイク状に多数 ($\sim 10^6$ 個) 分割してピクセル化したものである。ピクセル化によって高い位置分解能 ($\sim$ 数 10 μm) を実現し、電荷転送によって前段増幅器からみた電気容量を小さくすることに成功している。しかし、それぞれのピクセルに蓄えられた電荷を逐次的に一つ一つ読み出していくことから時間分解能は悪く ($\sim$ 数 sec)、リアルタイムの photon counting はできない。CCD については次章で詳しく述べる。

1.2.3.6　マイクロカロリメータ

マイクロカロリメータは、100 %に近い検出効率と半値全幅約 10 eV のエネルギー分解能を実現し、しかも空間的に広がった X 線源も観測可能にする。原理として、入射 X 線光子の吸収による吸収体の温度上昇から、X 線の検出とそのエネルギー測定を行なう。1 個の X 線光子を吸収したときに生じる温度変化は非常に小さい。しかし、検出器の動作温度を絶対零度近くまで下げることで、雑音を極限まで小さくし、吸収体の熱容量を小さくすることができる。入射 X 線のエネルギーは吸収体の格子振動の大きさ (フォノンと

いう形に量子化される) で測定される。よってエネルギー分解能はフォノン数の統計的揺らぎによって決まる。1 個のフォノンを生成するのに必要なエネルギーは $\sim 10^{-4}$ eV と非常に小さいため、生成されるフォノンの数は非常に多い。よって、エネルギー分解能は非常によく理論的には $\sim$ 1 eV になる。時間分解能は吸収体の温度が元に戻る時間で決まり、数 msec である。

「すざく」にも搭載され、冷却装置により 60 mK まで冷却し、予定した通りの X 線分光性能も確認されたが、充填していた液体ヘリウムが全て気化してしまう不具合から観測は不可能となった。

現在では 6 keV で $\sim$ 6 eV のエネルギー分解能を持つ半導体温度計を用いたカロリメータのほか、超伝導-常伝導転移点を温度センサとして利用した超伝導遷移端（TES：Transition Edge Sensor）X 線マイクロカロリメータなど、さらによいエネルギー分解能をもった検出器が開発されつつある。

1.2.3.7 X 線 CCD 検出器の必要性

X 線天文衛星に搭載される X 線望遠鏡の焦点面検出器に要求される性能としては、主に

- エネルギー分解能
- 位置分解能
- 検出面積の大きさ
- 検出効率
- 時間分解能

が挙げられる。X 線 CCD 検出器は、優れた撮像能力とほどよいエネルギー分解能を持ち、バランスのとれた検出器である。「すざく」では硬 X 線検出器 (HXD) との組合せで広い帯域での同時観測という特徴を生かした成果が期待される。

CCD は今や標準的な X 線焦点面検出器となっており、1999 年に打ち上げられた Chandra (アメリカ)、XMM (ヨーロッパ) や 2005 年に打ち上げられた「すざく」 (日本) 、そして 2014 年度打ち上げ予定の ASTRO-H といった最近の大型 X 線天文衛星には全て搭載されている。

第2章　X線CCD検出器

X線CCD検出器は、固体撮像検出器の中では比較的大面積で、ピクセルの大きさで決まる高い位置分解能と中程度のエネルギー分解能を有し、2桁のエネルギー範囲に渡るX線の検出が可能なバランスのとれた検出器である。

以下、p型半導体が基板の場合について説明するが、n型半導体の場合も、印加電圧の正負とキャリア種（電子、両矢印、正孔）が変わるだけで基本的に同じである。

2.1　(X線)CCD検出器の構造

X線CCD検出器は基本的に、金属(Metal)の電極、酸化物(Oxide)の絶縁層、半導体(Semiconductor)のMOS構造で構成されている。X線CCD検出器の断面図を図2.1に示す。基本的に、CCDはMOSダイオードをモザイク状に多数並べたものである

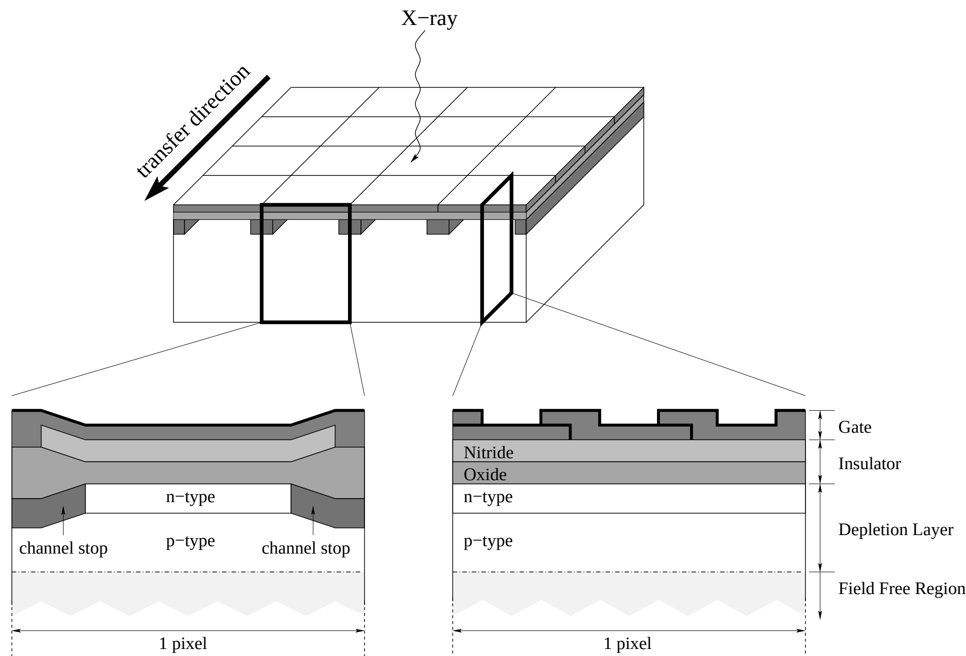


図2.1: p型（nチャネル）X線CCD検出器(三相)の断面図。

2.1.1　空乏層と中性領域

X 線 CCD 検出器の動作を考える場合の基本となる空乏層と中性領域について説明する。ここでは、p 型半導体が基板の場合について説明するが、N 型半導体の場合も、印加電圧の正負が変わるだけで基本的に同じである。

電極に正電圧をかけると、半導体部分では多数キャリアである正孔が電極とは逆向きに移動し、一時的にキャリアのない領域を形成する。この領域のことを空乏層 (Depletion Layer) という。ここで、正電圧をさらに大きくすると空乏層が厚くなり、ある厚さになると空乏層中で熱的に発生した電子正孔対の電子が、空乏層中に存在する内部電界により絶縁層の方向に移動し、絶縁層との界面付近にたまりはじめる。すると、電極から伸びている電気力線は界面の電子に終端し、外部電圧をさらに増やしても空乏層の厚さはほとんど変化しなくなる。界面付近では少数キャリアである電子の数密度が増大するという意味で、このような状態を反転状態とよぶ。

一方、空乏層にはイオンが残っており、イオンと移動したキャリアの間には、外部から加えられているのとは逆向きの電場が生じる。これが外部からの電場と釣り合うとキャリアの移動が止まるため、電場が 0 となる領域が存在する。この領域を中性領域という。

なお、中性領域で荷電粒子が連続的にエネルギーを失って電子を励起した場合、後に述べるように大きく広がったイメージを作り、その領域は X 線が入射しても検出されない Dead area になる。その Dead Area を少なくするため、中性領域の電極と反対側の領域に電極でかける電場と逆向きの電場をかけ、電子を CCD の背面に吐き出すことがある。これをバックバイアスと言い、バックバイアスがかかっている領域をバックバイアス領域と呼ぶことにする。XIS FI (表面照射型。詳しくは第 2.1.2 章で述べる) の場合、中性領域 675 μm のうち、バックバイアスが有効な厚みは 60 μm 程度である。なお、背面照射型 CCD では異なる目的でバックバイアスをかけることがあるので、両者を混同しないようにする必要がある。

半導体に p 型シリコンを使った CCD の場合、空乏層内で X 線が光電吸収されると、生成された電子正孔対の電子が電極に印加した電圧により空乏層内の絶縁層付近に移動し蓄積される。また、電極に加える電圧を規則的に変化させることで、蓄積された電荷を読み出し口まで転送し、最終的に電圧信号として読み出している。

2.1.2　表面照射型 CCD と背面照射型 CCD

CCD はその受光方向の違いにより表面照射型 (Front-Illuminated：FI) CCD と背面照射型 (Back-Illuminated： BI) CCD の 2 種類に分られる。

- 表面照射型
  表面照射型 CCD は電極側を受光面としたもので、X 線が電極近くで吸収される。そのため Si 中を電荷が電極へ向かう際に起こす拡散 (2.2.4 節参照) や再結合の効果が小さく、エネルギー分解能に優れる。ところが受光面に poly-Si 電極 (XIS[1]の場合

[1]「すざく」搭載 X 線 CCD カメラ。第??章で詳しく説明する。

で厚さ ~ 0.3 μm) や SiO_2 絶縁層 (同じく厚さ ~ 0.4 μm) といった構造を持つために低エネルギー X 線の透過率が悪く、その分だけ検出効率が下がる。

- 背面照射型
  背面照射型 CCD はその反対側を受光面としたものである。電極や絶縁層と同様に不感層 (または遮光層) として働いてしまう中性領域を可能な限り薄くするように加工されている[2]。そのため、低エネルギー側の検出効率は表面照射型 CCD に比べて優れている。ところが X 線の吸収点が電極から遠くなるためエネルギー分解能が悪くなる。またその加工は技術的に難しく、表面照射型に比べ歩留まりが悪くなる。

両者の検出効率を図 2.2 に示す。背面照射型 CCD では、不感層による吸収が減るために低エネルギー側の検出効率は高くなる。表面/背面照射型に依らず、高エネルギー側では空乏層をつき抜けてしまう確率が高くなるために検出効率は低くなる。

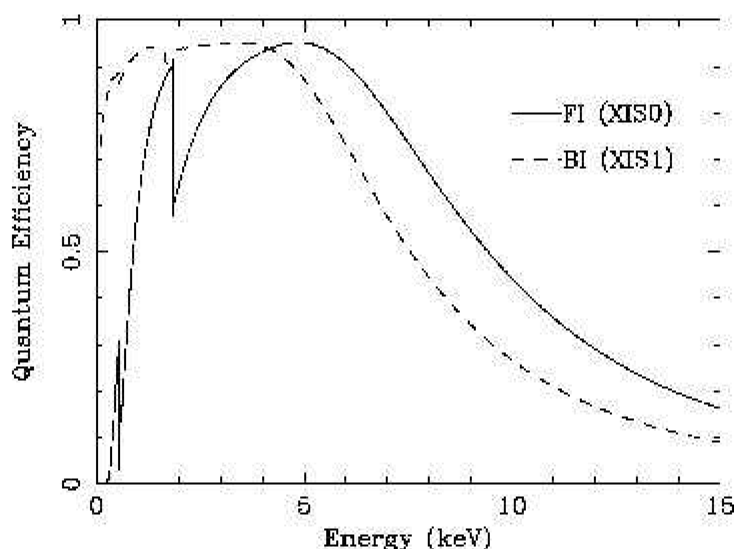


図 2.2: 表面照射型 CCD（XIS0：実線）と背面照射型 CCD（XIS1：破線）の検出効率 [10]。Si 吸収端 (1.84 keV)、O K 吸収端 (0.543 keV) による段差が見られる。

2.1.3 電荷転送と読み出し

各ピクセルに蓄えられた電荷は、読み出し口まで転送され最終的に電圧信号として取り出される。転送から電荷-電圧変換を経て読み出されるまでの流れを説明する。

2.1.3.1 転送方式

CCD は利用目的の違いにより、Full Frame Transfer、Frame Transfer、Interline Transfer 型 CCD が使い分けられる。ここでは、Full Frame Toransfer 型 CCD と Frame Transfer 型 CCD について説明する。

[2]XIS では完全空乏化を達成している。

Full Frame Transfer 型

Full Frame Transfer 型 CCD は、撮像領域をそのまま読み出し領域に使い、他の CCD のような蓄積領域や縦転送専用領域がないため構造的には最も単純な CCD である。むき出しの CCD は電荷転送中も受光をするため、CCD の電荷転送が十分速く行われない場合は転送途中で光子を受けてしまい、本来とは異なる位置の情報を持った電荷が発生しまうことがある。そのため、Full Frame Transfer 型 CCD は、通常シャッターを併用することでこの問題を回避している。ただし、シャッターを使うと露光が間欠的になり、機構が複雑になり信頼性に欠けるため衛星搭載品としては通常は使わない。

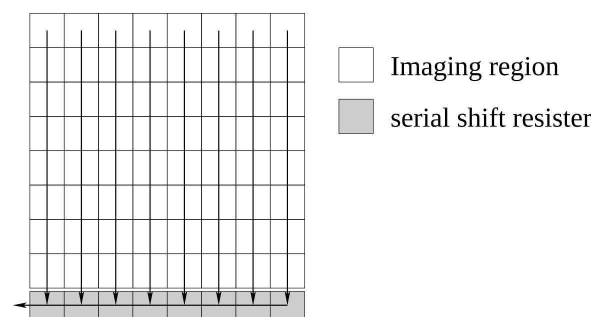


図 2.3:
Full Frame Transfer 型の転送方式の模式図

Frame Transfer 型

Frame Transfer 型 CCD は通常の撮像領域の他に、露光後の CCD フレームデータを一時的に保持しておくための蓄積領域を持つ。蓄積領域は撮像領域と同様に CCD 素子を用いたメモリアレイとなっているが、上面にシールドを設け、高エネルギー X 線に対しても常に遮光された状態を作っている。撮像領域である受光面のデータを短時間で蓄積領域に転送し、蓄積領域から読み出し口まで転送が行なわれると共に、受光面では次の露光が行なわれる仕組みになっている。蓄積領域の上面を遮光することが容易であるため、衛星搭載用 X 線 CCD 検出器ではこの方式が主流である。ただし、CCD の半分しか撮像に使えず、蓄積領域に至るまでの短時間の縦転送中は、入射 X 線位置が正しく記録されない。

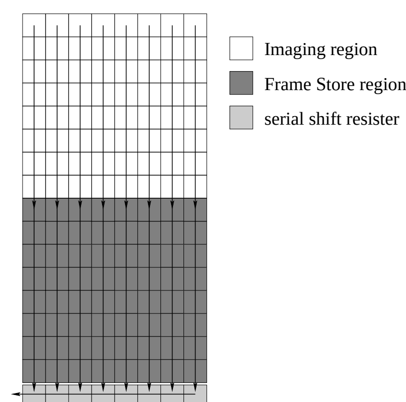


図 2.4:
Frame Transfer 型の転送方式の模式図

2.1.3.2 転送方法

CCD は 2 次元の画像データを 1 個 (CCD の種類によっては複数) の読み出し口から出力するため、各ピクセルに蓄えられた電荷を読み出し口まで縦及び横転送させなければならない。Frame Transfer 型 CCD を例に、転送の順序を追っていく (図 2.5)。

まず、1 フレームの露光が終了すると撮像領域のピクセルに蓄えられた電荷は ST (Storage or Frame-Store) clock によって蓄積領域に高速転送される。次に、縦転送クロックによって 1 ラインずつを serial shift register に転送する。serial shift register は横転送のみを行なうレジスタである。serial shift register 内の電荷が横転送クロックで全て読み出し口まで転送されたら、次の 1 ライン分の縦転送を行なう。以下、これらを垂直方向のピクセル分だけ繰り返していく。こうして、1 フレームに蓄えられた電荷の全てが読み出し口へ到達することになる。読み出し口ではその電荷が電圧に変換されて出力信号となる。

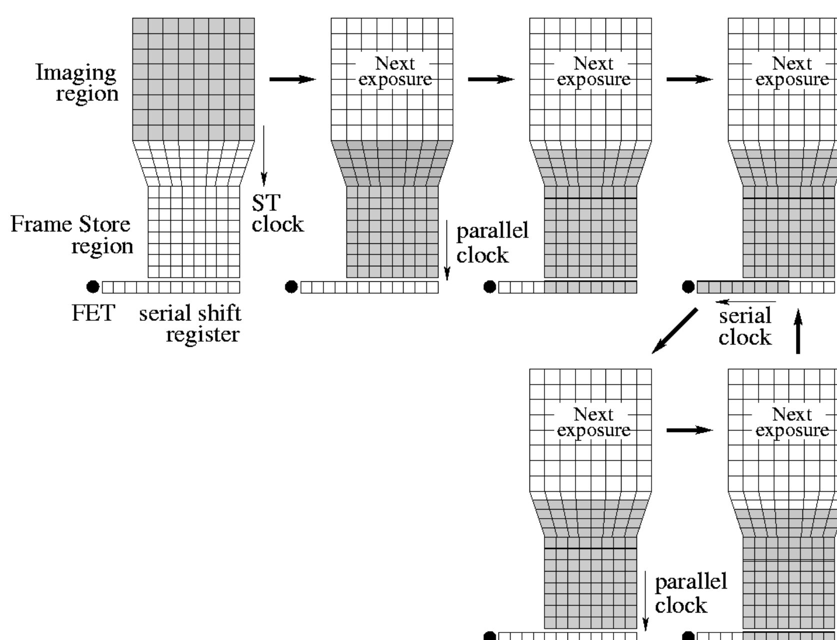


図 2.5: Frame Transfer 型 CCD における電荷転送の時系列。

電荷転送クロックには、組み合わせているクロック (電極に与える電圧レベルの周期パルス) の数に応じて二相クロック、三相クロックなどがある。それぞれの動作原理を図 2.6 に示す。二相クロックでは一つ一つの電極下にイオン注入等を施して同一電極においてポテンシャルの差ができる構造にしておき、二種類のクロックを交互に反転させて電荷を転送させている。この場合、図 2.6 の左図の様に転送方向がイオン注入の仕方に従った方向のみに限られる。

2.1.3.3 Overclocking

2.1.3.2 節の方法で CCD チップの全ピクセルの電荷を読みだすことができるが、科学目的の使用では転送・読み出しにおけるノイズの評価のためにピクセル数以上の読み出

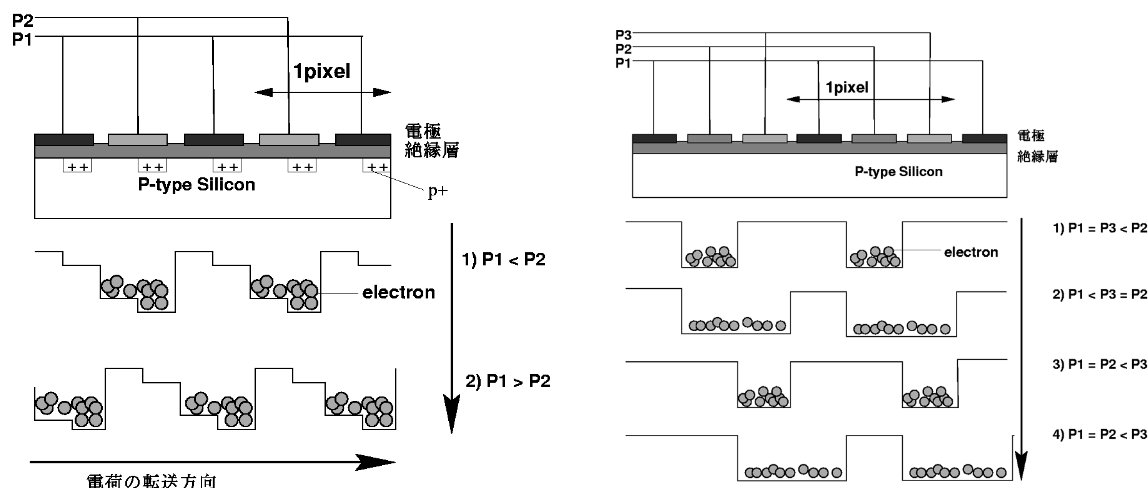


図 2.6: 二相クロック (左) と三相クロック (右) による電荷転送の模式図。下の図はクロックパターンごとのポテンシャルレベルを示している。

し (overclocking) を行なうことが多い。こうして得られた仮想的なイメージ領域を Over-Clocked Region と呼ぶ。Over Clocking Region には電荷が含まれないので、電気回路のみの雑音特性を評価したり、撮像領域との差を調べることで暗電流の精密な値を調べるのに用いられる。

横転送に overclocking をすることで作られる仮想イメージ領域を Horizontal Over-Clocked region (HOC 領域)、縦転送に overclocking をすることで作られる仮想イメージ領域を Vertical Over-Clocked region (VOC 領域) と呼ぶ。

2.1.3.4 電荷-電圧変換

各ピクセルに蓄えられた電荷は、電荷転送によって読み出し口まで運ばれ、電圧レベルに変換される。読み出し口での電荷-電圧変換の方法として、FDA (Floating Diffusion Amplifer) が広く使われている。FDA は電荷リセット用 MOSFET スイッチ (MOS FET 1) と電荷-電圧変換用 MOSFET スイッチ (MOS FET 2) で構成され、リセット用 FET のゲート (RG: Reset Gate) とドレイン (RD: Reset Drain)、並びに電荷-電圧変換用 FET のドレイン (OD: Output Drain) と FET2 部への電荷移動をコントロールするゲート (OG: Output Gate) に外部回路から制御電圧を印加して使用する。出力信号は電荷-電圧変換用 FET のソース (OS: Output Source) に適当な負荷抵抗をつけて取り出す。1 ピクセル分の信号を読み出すには次のような手順をとる。

1. SG の電圧と RG の電圧を HIGH にして、MOS FET 1 を ON にする。すると、Floating Diffusion に蓄積された電荷が RD に流れ、Floating Diffusion の電位が RD の電位と等しくなる (図 2.7 (A))。

2. RG の電圧を LOW にして、MOS FET 1 を OFF にする。すると RD と読み出し口は切り離され、MOS FET 2 の出力は OD と OG によって決まる値になる。このと

きの出力電圧を Floating Level といい、このピクセルの出力電圧を決める際の基準電位となる。このとき、SG は HIGH のままなので、転送されてきた電子は SG の電極の下に蓄積される (図 2.7 (B))。

3. SG の電圧を LOW にする。すると、SG に蓄積された電荷が Floating Diffusion に流れ、MOS FET 2 のゲート電圧が下がる。よって、負荷抵抗による出力電圧は、Floating Diffusion に流れ込んだ電荷の分だけ下がる。このときの出力電圧を Signal Level という (図 2.7 (C))。

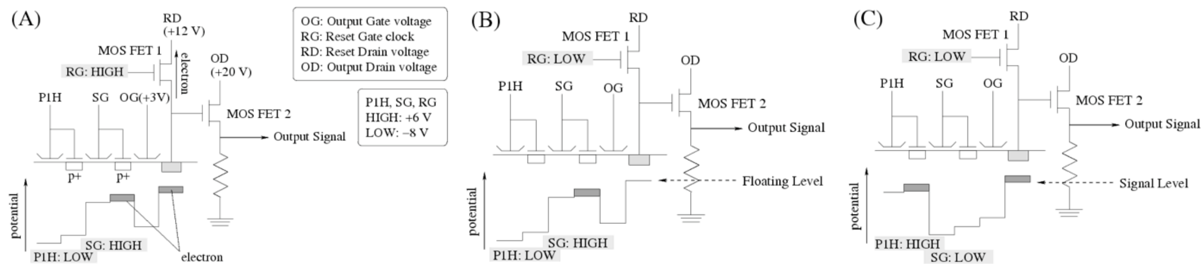


図 2.7: X 線 CCD 検出器の電荷検出機構 (FDA)。(A), (B), (C) の手順を繰り返して全ピクセルの電荷を電圧信号として読み出す。

FDA によって変換された CCD 出力波形は、図 2.8 の様になる。Floating Level から Signal Level に移り変わるところで、Serial Register から読み出し口に電荷が送り込まれている。Floating Level と Signal Level の差は、各ピクセルに蓄えられた電荷量に比例しており、これを外部回路で測ることによってそのピクセルの信号波高値が分かる。ただし、光が CCD に入射していないときも Floating Level と Signal Level の差はゼロにはならない。これは、主に暗電流 (2.4.1 項参照) と寄生容量による電気的なオフセットがあるためで、この成分をダークレベルと呼んでいる。

2.1.3.5 波高値の取得

CCD の各ピクセルの出力信号の大きさを波高値 (Pulse Height: PH) と呼ぶ。図 2.8 に示した出力信号から PH を求めるには、Signal Level と Floating Level をサンプリングし、その差を調べれば良い。PH を算出するために用いられる出力信号のサンプリング法を以下に挙げる。

- 遅延方式
  遅延方式は遅延回路を用いて Signal Level と Floating Level の差を求める方法である。波形の引き算の様子を図 2.9 に示す。まず、遅延回路を使ってタイミングをずらした出力波形を生成し、それと元の出力波形を引き算することで Signal Level と Floating Level の差をパルス波として出力させる。そしてこのパルス波の波高値をサンプルホールド回路でホールドし、Analog-to-Digital Converter(ADC) でその電圧値をデジタル信号に変換する。この方式は単純ではあるものの遅延線の性能に制限され、高速データ取得が困難である。「あすか」SIS ではこの方式が使われた。

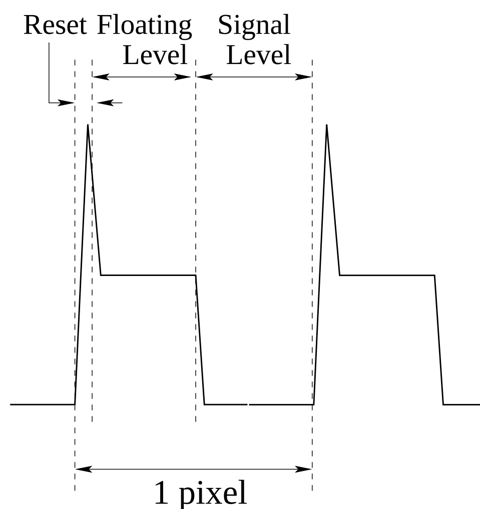


図 2.8: CCD の出力波形。読み出し口に送られた電荷は、読み出し用のコンデンサに蓄えられ、Siganl Level の電圧をつくる。この電荷は Reset Pulse と共に排出され、Floating Level の電圧値となる。

- 相関多重サンプリング
  相関多重サンプリングは、Signal Level と Floating Level の値をそれぞれ複数回サンプリングし、その差の平均値を求める手法である (図 2.10)。サンプリングの回数が多い程ノイズは平均化されるので分解能が向上する。ただし、相関多重サンプリングは ADC のサンプリング速度に制限されており、サンプリングの回数が増えるとその分データ取得にも時間がかかってしまう。サンプリングの回数が 1 回の方式を相関二重サンプリングと呼ぶ。

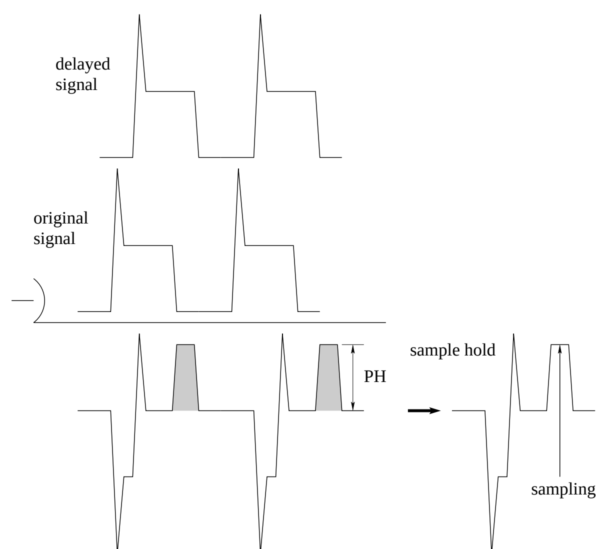


図 2.9: 遅延方式における PH のサンプリング。

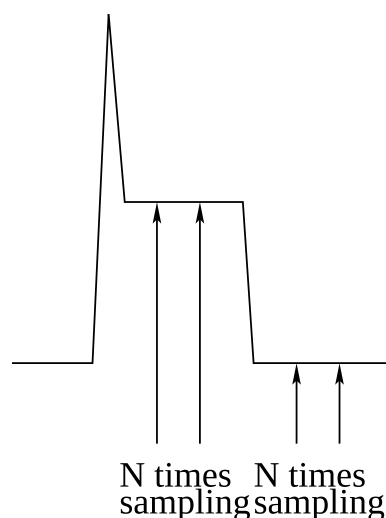


図 2.10: 相関多重サンプリング。

- 積分方式

積分方式は積分回路を使った手法で、Signal Level と Floating Level をそれぞれ一定時間積分し、その差をとることによってピクセルの PH を算出する (図 2.11)。この方式は信号の各レベルをある区間に渡って積分するため、相関多重サンプリングと同様にノイズが平均化され出力値の精度が向上する利点がある。また、遅延回路や相関多重サンプリングにおいて生じるような制限はなく、高速データ取得に向いている方式である。「すざく」XIS はこの方式を採用している。

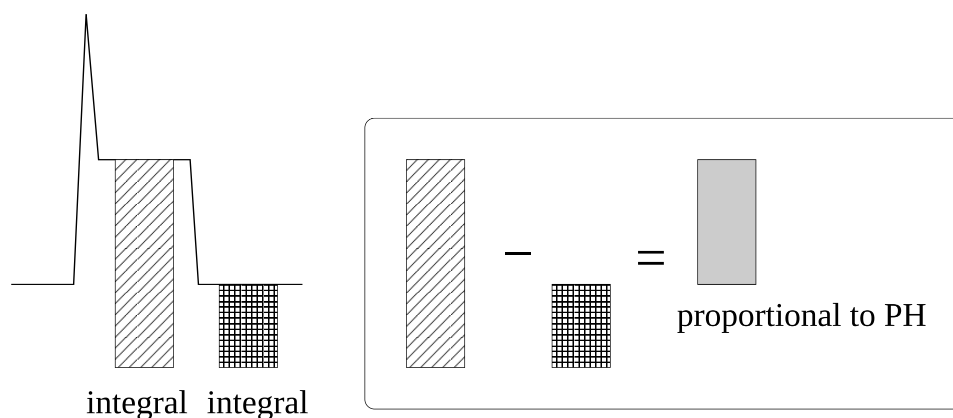


図 2.11: 積分方式によるサンプリング。

2.2　X 線検出の原理

X 線が CCD に入射すると、ある確率で CCD 内部で光電吸収され、初期電子雲を生成する。電子雲は電極方向へドリフトしながら拡散することになる。表面照射型 CCD を例に、この X 線検出過程を詳しく述べる。

2.2.1　X 線と CCD の相互作用

X 線が CCD に入射し、光電吸収してから電子雲を形成するまでの過程を順を追って説明する。

2.2.2　光電吸収

1.2 節で述べた通り、10 keV 以下の X 線の相互作用は光電吸収が支配的である。CCD に入射した X 線も、エネルギーが低いと空乏層の手前の不感層によって吸収されてしまい、エネルギーが高いと空乏層をつき抜けてしまう。エネルギー E の X 線が空乏層で光電吸収される確率（検出される確率）$Q(E)$ は、

$$Q(E) = \exp\left(-\int_{\mathrm{DL}} \mu_{\mathrm{DL}}(E)\ dl\right) \times (1 - \exp(-\mu_{\mathrm{Si}}(E)\ l_{\mathrm{dep}})) \tag{2.1}$$

l_{dep} : 空乏層厚
l : 光子の軌跡に沿った長さ
$\mu_{\mathrm{DL}}(E)$: 電極などの遮蔽物の吸収係数
$\mu_{\mathrm{Si}}(E)$: シリコンの吸収係数

となる。積分記号の DL は、不感層表面から空乏層との境界までの X 線の軌跡に沿った積分を表す。

2.2.3　電子雲の生成

入射 X 線のエネルギーが Si K 吸収端 (1.84 keV) 以上ならば、X 線はほぼ K 殻に吸収される。Si K 吸収端以下で L 吸収端以上のエネルギーの X 線は L 殻に吸収される確率が高くなる。ここでは入射 X 線が K 殻で吸収された場合を例に、光電吸収後の素過程について説明する。

入射 X 線 (エネルギー E) が Si 原子の K 殻に光電吸収されると、X 線のエネルギーが与えられた K 殻電子は原子の束縛に打ち勝ち、光電子となって K 殻の外に飛び出す。そのときの光電子のエネルギーは K 殻束縛エネルギーを E_K として、$E - E_K$ で与えられる。この光電子が Si 結晶中を動きまわることにより、価電子帯にいる電子を次々に励起して、$E - E_K$ に比例した数の電子正孔対を作り出す。1 対の電子正孔対を作り出すのに

必要な平均のエネルギーを w とすれば、光電子によって作られる電子正孔対の平均個数 $N_{\rm photo}$ は

$$N_{\rm photo} = \frac{E - E_K}{w} \tag{2.2}$$

である。一方、光電子を放出した Si 原子は外殻電子が遷移して基底状態に戻る。このとき、そのエネルギー差 E_K が Auger 電子または特性 X 線の放出によって解放される。励起状態の原子では、Auger 電子放出と特性 X 線放出が競合しており、Si 原子の場合は $\sim$ 95 %の確率で Auger 電子が放出される (図 1.2 参照)。Auger 電子放出後空孔が残り、原子は励起状態にある。従って、Auger 電子の持つエネルギーは E_K よりも小さい。励起状態にある原子が基底状態に戻るときに放出されるエネルギーも合せると E_K になる。Auger 電子の平均個数 $N_{\rm Auger}$ は

$$N_{\rm Auger} \simeq \frac{E_K}{w} \tag{2.3}$$

となる。残りの ~ 5 %の確率で特性 X 線を放出した場合、過程はやや複雑になる。この特性 X 線が同一ピクセル内で Si 原子に再吸収されれば、そのエネルギーに比例した個数の電子正孔対を作り出すので、式 (2.3) と等しい個数の電子正孔対を作る。しかし、特性 X 線が隣接しないピクセルで再吸収されたり検出器外に逃げてしまった場合、エネルギー E_{K_α} 相当の電子正孔対が失われ、入射 X 線エネルギーを低く見積もることになる[3]。これをエスケープイベントと呼ぶ。さらに、特性 X 線が再吸収されたピクセルでは Si 特性 X 線が検出される

結局、入射 X 線のエネルギーが同一または隣接するピクセル内で全て解放されたとすると、最終的に作られる電子正孔対の個数 N は

$$N = N_{\rm photo} + N_{\rm Auger} = \frac{E}{w} \tag{2.4}$$

で表される。このとき生成される多数の電子群は初期電子雲と呼ばれている。

1 対の電子正孔対を作り出すのに必要なエネルギー w は物質によって決まっていて、シリコンの場合は $w \sim 3.65$ eV である。したがって、5.9 keV の X 線が吸収されると $N \sim 1600$ 対の電子正孔対が作られることになる。初期電子雲の大きさは電子の最大飛程程度と考えられ、形状は近似的に直径 $0.0171 \times (E/{\rm keV})^{1.75}$ μm の球で表される。X 線のエネルギー領域では、この値 (5.9 keV に対して ~ 0.4 μm) は CCD のピクセルサイズ (10 – 30 μm) に比べて十分小さく、点とみなすことができる。

光電吸収が空乏層で起きた場合、初期電子雲は電場によって電極付近に集められる。しかし、X 線が中性領域で光電吸収されることもある。中性領域では電場が非常に弱いため、電子雲が電極付近に達するまでには時間がかかる。また、中性領域において不純物濃度や結晶格子の欠損率が高い場合には、伝導帯にある電子が価電子帯に遷移して電子正孔対が消滅する再結合過程の影響が大きくなる。したがって、空乏層で吸収される場合に比べて、電極付近に到達するまでに多くの電荷を失ってしまうことになる。その結果、入射 X 線のエネルギーが過小評価されてしまうため、X 線 CCD 検出器のエネルギー分解能を低下させることになる。そのため、X 線 CCD 検出器においては検出効率の向上と

[3]L 殻よりも外側の準位間の遷移による光子は、常にピクセル内で吸収されるものと考えてよい。また、Si 原子の K_α 線のエネルギーは 1.74 keV である。

いう側面だけでなく、エネルギー分解能の劣化を防ぐためにも、できる限り厚い空乏層を形成させる工夫を施す必要がある。ただし、中性領域でできた電子雲は最終的に大きく拡がるため、通常はデータ処理の過程でこれらのイベントを除去するようにしている。

2.2.4 空乏層中での電子雲の移動（ドリフト）

光電吸収によって生成された初期電子雲は、電場によって電極方向にドリフトする。その際、自らの熱運動によって熱拡散する。表面照射型と背面照射型について、電子雲のドリフトおよび熱拡散の様子の模式図を図 2.12 に示す。表面照射型の場合、高エネルギー X 線は CCD 表面から比較的深いところで吸収されるので、電子雲は大きく拡がる。背面照射型の場合はその逆になる。

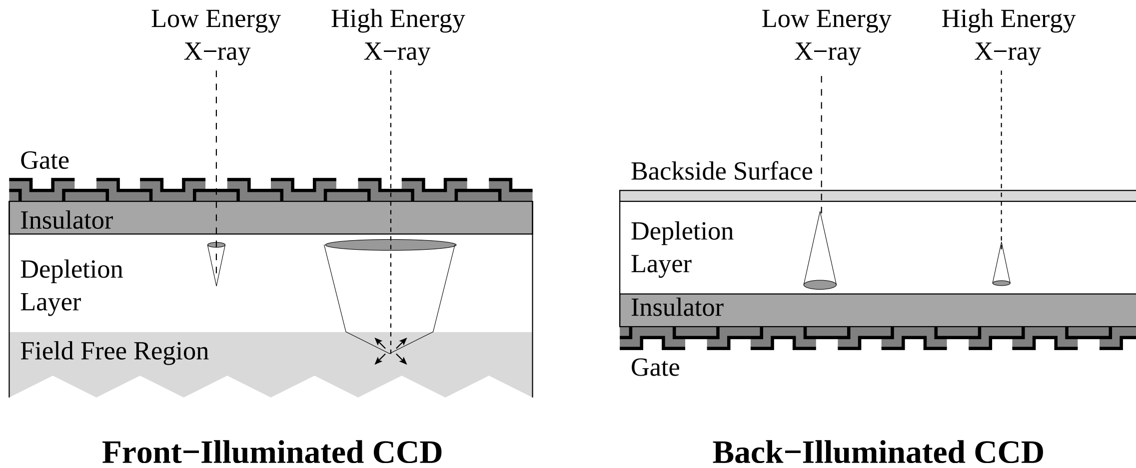


図 2.12: 電子雲のドリフトと熱拡散の様子の模式図。

2.2.4.1 ドリフト

空乏層で生成された初期電子雲は電極による逆バイアス電圧 V によって電極方向にドリフトする。z 軸を CCD 表面に垂直にとり、転送電極側から見た深さ方向を正とする。

空乏層でのポテンシャル Φ は、シリコンの誘電率 $\epsilon_{\rm Si}$、アクセプタイオン濃度を $N_{\rm A}$ [4]、素電荷を e とすると、Poisson 方程式

$$\frac{d^2\Phi(z)}{dz^2} = \frac{eN_{\rm A}}{\epsilon_{\rm Si}} \tag{2.5}$$

に従う。ここで、境界条件として空乏層の端で、電場と電位がともに 0 とする。つまり、空乏層厚を $l_{\rm dep}$ として、$z = l_{\rm dep}$ で $\Phi = 0$ かつ $d\Phi/dz = 0$ とすると、

$$\Phi(z) = \frac{eN_{\rm A}}{2\epsilon_{\rm Si}}\left(l_{\rm dep} - z\right)^2 \tag{2.6}$$

[4] XIS の場合、$N_{\rm A} = 3.5 \times 10^{12}\ {\rm cm}^{-3}$

したがって、空乏層での電場 $E(z)$ は、

$$E(z) = -\frac{d\Phi(z)}{dz} = \frac{eN_{\mathrm{A}}}{\epsilon_{\mathrm{Si}}}(z - l_{\mathrm{dep}}) \tag{2.7}$$

となる。また、空乏層には単位面積あたり $Q = -eN_{\mathrm{A}} l_{\mathrm{dep}}$ のアクセプタイオンが存在する。Gauss の定理より、空乏層での電場 $E(z)$ と絶縁層 $(z = 0)$ での電場 E_{I} の間には、絶縁層の誘電率を ϵ_{I} として次の関係がある。

$$\begin{aligned} \epsilon_{\mathrm{I}} E_{\mathrm{I}} &= \epsilon_{\mathrm{Si}} E(z = 0) = Q \\ E_{\mathrm{I}} &= \frac{Q}{\epsilon_{\mathrm{I}}} \end{aligned} \tag{2.8}$$

したがって、絶縁層中のポテンシャル $\Phi_{\mathrm{I}}(z)$ は

$$\Phi_{\mathrm{I}}(z) = \frac{Q}{\epsilon_{\mathrm{I}}} z + \Phi(z = 0) \tag{2.9}$$

となる。絶縁層の厚さを l_{I} とすると、電極に加える電圧 V と空乏層厚 l_{dep} の関係式が導けて、

$$V = \Phi_{\mathrm{I}}(z = -l_{\mathrm{I}}) = eN_{\mathrm{A}} \left(\frac{l_{\mathrm{dep}}}{2\epsilon_{\mathrm{Si}}} + \frac{l_{\mathrm{I}}}{\epsilon_{\mathrm{I}}} \right) l_{\mathrm{dep}} \tag{2.10}$$

となる。式 (2.10) は、電極に加える電圧を大きくすれば単調に空乏層厚が大きくなることを示しているが、実際には V を大きくしていくと、伝導帯に励起されるキャリアが増え、表面付近のキャリア濃度が上昇して反転層を形成するため、空乏層厚はある値以上には大きくならない。

初期電子雲は式 (2.7) で表される電場に引かれて電極方向へドリフトする。ドリフト速度は、熱拡散速度を無視できる条件のもとで移動度 (mobility) μ_z を用いて次式で表される[5]。

$$\frac{dz}{dt} = -\mu_z E(z) = \frac{e\mu_z N_{\mathrm{A}}}{\epsilon_{\mathrm{Si}}}(l_{\mathrm{dep}} - z) \tag{2.11}$$

また、深さ z で吸収された X 線により生成された初期電子雲が、転送電極 $(z = 0)$ に到達するまでに要する時間 t は、X 線が $z = 0$ で吸収されたときに $t = 0$ という条件を使うと

$$t = \frac{\epsilon_{\mathrm{Si}}}{e\mu_z N_{\mathrm{A}}} \ln \left(\frac{l_{\mathrm{dep}}}{l_{\mathrm{dep}} - z} \right) \tag{2.12}$$

となり、空乏層厚の半分の深さで吸収されたとすれば、~ 1 nsec (XIS の場合) となる。

bsubsection 熱拡散 初期電子雲は、ドリフトと同時に自らの熱運動によって拡散する。そのときの電子雲の運動は拡散方程式に従う[6]。

$$\frac{d\rho_{\mathrm{N}}}{dt} = D\nabla^2 \rho_{\mathrm{N}} \tag{2.13}$$

[5]通常の X 線 CCD 検出器の動作条件 ($T \sim 180$ K) では、熱拡散速度 $v_{\mathrm{T}} = \sqrt{3k_{\mathrm{B}}T/m_e^*} \sim 2 \times 10^7$ cm/sec であり (m_e^* は電子の有効質量)、式 (2.11) から計算されるドリフト速度は、$\sim 10^7$ cm/sec である (XIS の場合。$\mu = 1500$ cm^2/V/sec として計算した)。

[6]電子間には反発力も働いているが、通常は無視できる。

ただし、$\rho_{\rm N}$ は電子数密度、D は拡散定数である[7]。温度 T の場合、拡散定数と移動度の間にはEinsteinの関係式 (2.14) が成り立つ。Boltzmann 定数を $k_{\rm B}$ として、

$$D = \frac{k_{\rm B} T \mu_z}{e} \tag{2.14}$$

z 軸に垂直な xy 平面で、式 (2.13) を解くと、

$$\begin{aligned} \rho_{\rm N} &= \frac{1}{\sqrt{(4\pi Dt)^3}} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{4Dt}\right) \\ &= \frac{1}{\sqrt{(4\pi Dt)^3}} \exp\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right) \end{aligned} \tag{2.15}$$

となる。ここで、$r \equiv \sqrt{x^2+y^2}$ とした。これは、電子数密度 ρ_N が2次元Gauss分布となることを示しており、そのときの電子雲を転送電極上に射影したときの拡がり σ は、

$$\sigma = \sqrt{2Dt} = \sqrt{2D\frac{\epsilon_{\rm Si}}{e\mu_z N_{\rm A}} \ln\left(\frac{l_{\rm dep}}{l_{\rm dep}-z}\right)} \tag{2.16}$$

となる。この熱拡散のために電子雲が複数のピクセルにまたがりやすくなる。ただし、空乏層厚の半分の深さで吸収されたとすれば $\sigma \sim 2.4\ \mu$m 程度 (XISの場合) であるのに対し、1ピクセルの大きさは数 $10\ \mu$m なので、1個のX線光子がつくる電子雲の多くは1ピクセルにおさまり、複数のピクセルにまたがるにしても 2×2 ピクセルの範囲におさまる。

2.2.5　Grade判定法

X線の入射により生成された電子のかたまり (電子雲) は、電極付近に集められる間に拡散等で数 μm 程度広がる。ピクセルの境界付近にX線が入射すると、電子雲は境界で分られるため、信号も2つ以上のピクセルにまたがることになる。このように電荷が2ピクセル以上にまたがった場合、洩れ出した電荷の分を足し合わせる必要がある。しかし、各ピクセルごとにダークレベルに揺らぎがあるため、3×3 ピクセル中の全てのピクセルを足し合わせるとエネルギー分解能を悪くしてしまう。そのため、スプリット閾値を設け、この閾値を越えたピクセルレベルのピクセルについて足し合わせることにする。

また、パイルアップやX線以外の宇宙線がCCDに入射した場合、これらのイベントを除去できるのが望ましい。この2つを防ぐために用いられるのがグレード選別である。図2.13に示す。これらのグレードのうち解析に用いられるのは、グレード0、2、3、4、6、である。

[7] XISの場合、$D = 35.0\ {\rm cm}^2/{\rm sec}$

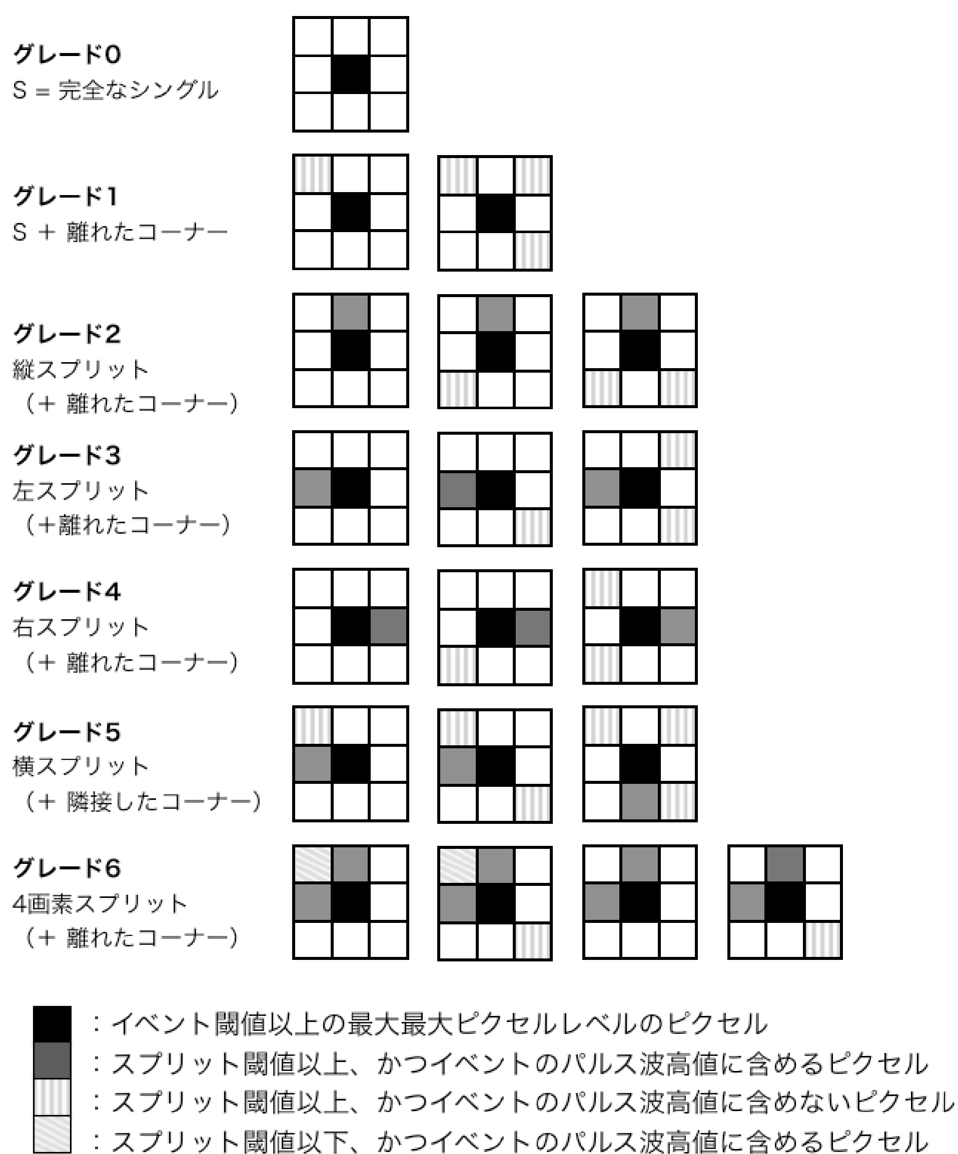


図 2.13: Grade 判定法による Grade の定義。Grade 0 – 6 のいずれにも当てはまらないイベントは Grade 7 に分類される。

2.3　性能の指標

CCD を検出器として使用する場合、X 線のエネルギーや入射位置をより正確に決定すること、X 線をより効率的に検出することが性能として求められる。以下、検出器として求められる性能についてまとめる。

2.3.1　エネルギー分解能

CCD に単色 X 線が入射し、検出されたときに出力される PH のヒストグラムは、ある幅 (エネルギー分解能) をもった Gauss 関数で近似できる。この幅を決定するのは、入射した X 線によって生成される電子数の統計的な揺らぎと読み出しノイズも含めたダークレベルの揺らぎである。

入射した X 線によって生成される電子数の統計的な揺らぎは、標準偏差が電子数の 1/2 乗に比例する Gauss 分布になることが知られ、その比例係数は Fano 因子と呼ばれる。Fano 因子は、電離・励起過程における個々の衝突が独立で起こるものであれば 1 となるはずである。しかし、実際は個々の衝突が独立でないために揺らぎは小さくなり、Fano 因子は 1 よりも小さくなる。この統計的な揺らぎが X 線 CCD 検出器の限界分解能を決定している。一方、電子数の統計的な揺らぎ以外にも CCD の分解能に関係する揺らぎが存在する。それは、主に暗電流の揺らぎと読み出しノイズによる揺らぎで、以後これをダークレベルの揺らぎと呼ぶことにする。

これらの揺らぎから、エネルギー E の X 線が検出された場合の X 線 CCD 検出器のエネルギー分解能は、1 対の電子正孔対を作るのに必要な平均のエネルギー $w = 3.65$ eV と Fano 因子 $F = 0.12$、ダークレベルの揺らぎ N を用いて以下の式で表される:

$$\delta E = \sqrt{F \times \frac{E}{w} + N^2} \tag{2.17}$$

一般的にエネルギー分解能を表すときには、半値幅 (Full Width at Half Maximum: FWHM) が使われる。これは、ピークの最高値のちょうど半分の高さにおける分布の幅で定義される。Gauss 分布の場合は、式 (2.17) を $\sqrt{8 \ln 2} \sim 2.35$ 倍したものとなる。外部ノイズの影響を全く受けなかった場合 ($N = 0$) の CCD のエネルギー分解能は Mn K_α (5.9 keV) で 120 eV である。これが CCD のエネルギー分解の理論上の限界となる。

2.3.2　量子検出効率

入射した X 線のうち、検出できる割合を示したものが検出効率である。X 線 CCD 検出器における検出効率 Q は、次のように定義される:

$$Q = \frac{N_{\rm detect}}{N_{\rm enter}} \tag{2.18}$$

ここで、$N_{\rm detect}$, $N_{\rm enter}$ はそれぞれ CCD で検出された光子数、CCD に入射した光子数である。X 線が空乏層で吸収される確率 (式 (2.1)) が、CCD の検出効率を決定する主要因

であるが、現実にはイベント抽出によってX線イベントとして認識されたものを光子数とするため、イベント抽出の方法によって検出効率は変化する。したがって、イベント抽出には正確かつ最大限、X線イベントのみを抽出する工夫が必要となってくる。

2.4 性能劣化の原因

CCDはいくつかの原因によりその性能が劣化することが知られている。ここではその原因のうち主なものについて述べる。

2.4.1 暗電流

一般には、放射線が全く入射していないのにもかかわらず、放射線検出器に流れる電流のことを指す。CCDにおいては、X線や可視光、荷電粒子などが入射していないのにもかかわらず、ピクセルに蓄積する電荷のことをいう。この暗電流は、主にSi結晶中の電子が自らの熱エネルギーによって価電子帯から途中の格子欠陥を経由して伝導帯へとバンドギャップを飛び越えることが原因である。そのため、CCD素子を冷却することによって暗電流を抑制することができる。暗電流が増加すると、その揺らぎによりエネルギー分解能の劣化をまねくことになる。また、宇宙線などによって格子欠陥が発生したピクセルは、多くの暗電流を生じる。多くの暗電流を生じたピクセルが、ホットピクセルやフリッカリングピクセルである。ホットピクセルは、CCD製造工程で生じる格子欠陥により、キャリアの吐き出し口になってしまう。また、フリッカリングピクセルは放射線損傷を受けたことにより、生じた格子欠陥が原因である。

2.4.2 電荷転送効率 (CTE)、電荷転送損失率 (CTI)

CCDのピクセルに蓄えられた電荷が転送されるときに、主に格子欠陥などによる電荷のトラップによって100 %転送されずに残ってしまうことがある。1回の転送につき、実際に転送される割合を電荷転送効率 (CTE: Charge Transfer Efficiency)、転送されずに残ってしまう割合を電荷転送損失率 (CTI: Charge Transfer Inefficiency) という。CTIとCTEの間にはCTI+CTE=1という関係がある。CTIが大きくなると、電荷転送が不完全となり、本来のX線のエネルギーより低い値を示してしまうことになる。CTIの値は、良くできたCCDでは $\sim 10^{-6}$ 程度だが、放射線損傷を受けると 10^{-5} - 10^{-4} に増加する。

2.4.3 読み出しノイズ

CCDから読み出された信号に、電子回路でのる雑音のことを言う。主には読み出し口における初段FETの熱雑音や1/fノイズ、リセットパルスによる揺らぎ、グランドレベルの揺らぎ、電源ノイズなどが原因である。

読み出しノイズを見積もるにはHOC領域を用いるのが簡単である。HOC領域のPHは横転送中に生じた電荷が読み出しノイズの影響を受けたものである。横転送時間は数msと短いため、転送中の暗電流による電荷の蓄積がほとんどなく、「読み出し」のみが影響すると考えられるからである。

2.4.4 パイルアップ

X線CCD検出器は、入射X線光子1個1個に対し、その入射位置とエネルギーを測定する検出器である。したがって、露光中に1ピクセルに複数のX線光子が入射した場合、個々のX線光子によって生成される電子雲が合成されて、個々のX線のエネルギーを知ることができなくなる[8]。このことをパイルアップという。

パイルアップが生じる確率は、X線の平均検出数に依存する。1撮像あたりに1ピクセルに入射し検出されるX線の平均個数をμとすると、注目している1ピクセルにn個のX線が検出される確率$P_\mu(n)$はPisson分布に従い、

$$P_\mu(n) = \frac{\mu^n}{n!}e^{-\mu} \tag{2.19}$$

で表される。この式から、ピクセル数がN個の領域にX線光子が一様に入射し、x個のイベントが検出された場合($\mu = x/N$)、注目している1ピクセルに1個の光子のみが検出される確率は、

$$P_\mu(1) = \mu e^{-\mu} \tag{2.20}$$

であり、1ピクセルに光子が1個も検出されない確率は

$$P_\mu(0) = e^{-\mu} \tag{2.21}$$

となる。注目する領域を3×3ピクセルとすると、パイルアップが生じる確率$P_{\rm pileup}$は、この領域のある1ピクセルにX線光子が1個だけ検出された場合に他の8ピクセルにはX線光子が検出されない確率を1から引けばよいので、

$$\begin{aligned} P_{\rm pileup} &= 1 - \frac{P_\mu(1) \times P_\mu(0)^8}{P_\mu(1) \times 1^8} \\ &= 1 - \exp(-8\mu) \end{aligned} \tag{2.22}$$

となる。512×512ピクセルのCCDに100個のX線イベントが検出されたとき、パイルアップが生じる確率は0.3 %程度である。パイルアップはCCDの露光時間を短くすることによってある程度回避できる。

[8]同一ピクセルだけではなく、注目している領域（典型的には3×3または5×5ピクセル）に複数のX線光子が入射した場合も同様である。

2.4.5 光洩れ

X 線 CCD 検出器は、X 線だけではなく可視光等にも感度があるため、それらによっても電荷が生成・蓄積され、ダークレベルの PH が変動する。このことを光洩れという。光洩れによる光量の揺らぎによってエネルギー分解能は劣化することになる。

光洩れが生じた場合、光洩れの成分を含めてダークレベルとして引くことによってキャンセルする。通常は大きく変化することはないが、衛星が日照から日陰もしくは日陰から日照に出たばかりのときは大きく変動する。そのため、その対策として、前の撮像データを次の撮像データに反映するよう、補正処理を行っている。

第I部

CCD 評価システムの開発

第3章　CCD 評価システムの設計と構築

本章では、今回構築した Pch-CCD 用の評価システムの構成と構築時のポイントについて述べる。

3.1　CCD 評価システムの開発目的

新たなX線 CCD 検出器の開発に当っては、様々な CCD を実験室で動作させる必要がある。CCD を動作させるには、その種類によらず、以下のような機能を持つ回路や装置が必要である。つまり、駆動電圧を供給するためのドライバ回路、出力信号を増幅するビデオ回路、それをデジタル化する A/D 変換回路などの電子回路系、これらの回路をコントロールするとともに取得データを保存する計算機、CCD を冷やすための冷却系、結露を防ぐための真空装置などである。状況によっては、A/D 変換の後にダークフレームの差し引き等のデータ処理を行うこともある。これらの装置群はそのまま多種類の CCD に使用できるか、あるいは、ごく簡単な変更で使用することができることから、汎用の CCD 評価システムを構築することが可能となる。

本研究では、バックグラウンド除去効率を高めた CCD を評価するにあたり、新たに CCD 評価システムを構築した。この評価システムは、当面本研究での CCD の評価を念頭においているものの、汎用に使うことができるシステムである。この CCD 評価システムに要求される性能を以下に示す。

- システムの低雑音性
  駆動読み出し回路系のノイズレベルが十分低いこと。具体的には電子個数換算で 10e- r.m.s. より低いこと。

- システムの長時間の安定動作
  長時間（数時間以上）連続してデータが取得できること。

- 十分な冷却性能
  駆動読み出し回路系のノイズレベルに対して、熱励起雑音を十分に低くできるだけ CCD を冷却し安定に維持できること。

- ４秒以下の CCD の撮像間隔
  CCD チップの撮像からデータ転送までの一連の動作を 4 秒以内に完結できること。

CCD 評価システムを構築するにあたって、我々の研究室も開発に加わっている ASTRO-H 衛星搭載X線 CCD カメラ（SXI）で使用する回路系の試作品（BBM1）を一部用いた。

これは、すでに上記要求を満たす回路系が開発されているので、なるべくその資産を流用することで開発の時間と手間を省くことができるからである。

3.2　システム設計

　システムの構成と動作の詳細について述べる。併せて、CCD の駆動および読み出し方法について示す。
CCD 評価システムは、大きくエレクトロニクス部と熱制御部からなる。エレクトロニクス部は、CCD に必要なクロック信号を生成する駆動系、CCD をマウントするヘッド基板、CCD からの出力信号を増幅しデジタル信号に変換する信号処理系、および両者を制御する制御系からなる。これらの系の構成に際しては、SXI の試作回路である BBM1 をベースにして、開発にかかる期間を短縮した。熱制御部は、CCD を冷却し温度を一定に保つ冷却系、および、CCD への結露を防ぐための真空槽と真空ポンプからなる排気系から構成される。CCD は真空槽内に設置されるため、エレクトロニクス回路の一部も真空槽内に設置される必要がある。本 CCD 評価システムでは、SXI での構成にならい、信号処理系の一部を真空槽内に配置している。図 3.1 に全体の構成を示す。
　以下、各部の詳細について説明する。

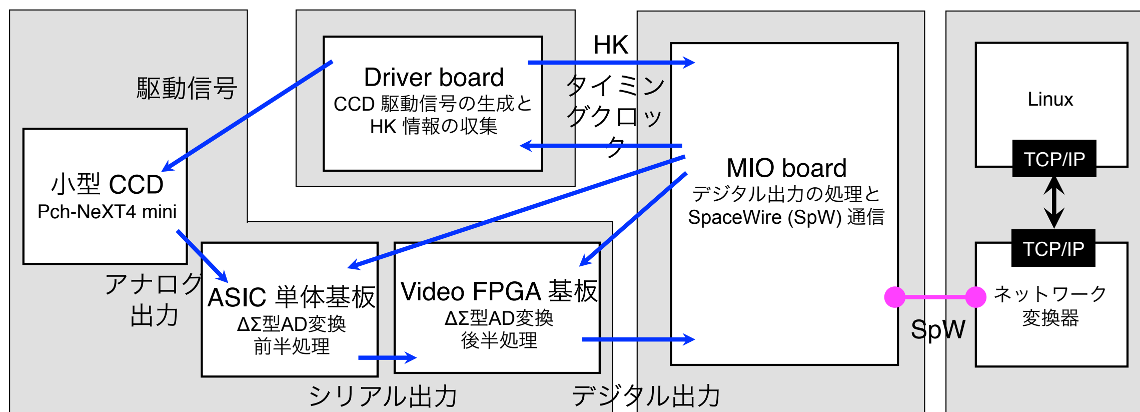


図 3.1: 全体のブロックダイアグラム。

3.2.1　駆動系

　駆動系は、CCD の電荷転送等に必要な矩形波（クロック）およびバイアス（定電圧）を CCD に供給する機能を持つ。表 3.1 に CCD の駆動およぶ信号読み出しに用いる主要な駆動信号を示す。駆動系は、制御系から供給されるクロックパターンに従って、アナログ信号としてクロックを生成する。また、クロック電圧（high level, low level）は、やはり制御系から設定される設定値（DAC 設定値）に従ってオペアンプとバッファ回路により作られる。このように生成されたクロック電圧を、highlevel 電圧源と low level 電圧源をアナログスイッチで高速で切り替えることにより駆動信号は生成される。また、ク

表 3.1: CCD 駆動信号

信号名称	略称	役割	信号の種類
出力トランジスタドレイン電圧	OD	信号読み出し用	バイアス
出力ゲート電圧	OG	信号読み出し用	バイアス
リセットドレイン電圧	RD	信号読み出し用	バイアス
バックバイアス電圧	BB	空乏層生成用	バイアス
垂直クロック電圧	PV	垂直シフトレジスタ用	クロック
トランスファーゲート電圧	TG	垂直シフトレジスタの最終ゲート用	クロック
水平クロック電圧	PH	水平シフトレジスタ用	クロック
サミングゲート電圧	SG	水平シフトレジスタの最終ゲート用	クロック
リセットゲート電圧	RG	信号読み出し用	クロック

ロック電圧として設定できる電圧範囲は、使用する電源電圧によって決まっている。

駆動系は、ドライバ回路と呼ばれ、それが実装された基板はドライバーボードと呼ばれる。ドライバーボードは、SXI チームから支給されたものである。ドライバ回路の出力はそのまま CCD 素子に供給することが可能であるが、SXI でのやり方を踏襲し、後述の ASIC 基板を通って CCD に供給される。

3.2.2　ヘッド基板

ヘッド基板は、後述する miniCCD に合わせ製作されたものである。ヘッド基板は、CCD パッケージの形状に合ったソケットを備え、CCD をマウントするとともに、冷却系とのインタフェースを提供する基板である。また、後述の ASIC 基板との信号のやり取りのためのコネクタを備えている。コネクタは、CCD からの信号出力用と CCD への信号入力用の二つを持つ。ヘッド基板上では、CCD からの出力信号はソースフォロアによるバッファを設けている。一方、CCD への入力信号には、不要高周波雑音を遮断する為に RC による LPF を後付けした。CCD を別の種類のものに交換する場合は、このヘッド基板を交換すれば良いことになる。

3.2.3　信号処理系

信号処理系では、CCD からのアナログ信号を増幅し (ビデオ回路)、デジタル信号に変換する役割を持つ。SXI では、アナログ信号の増幅とデジタル変換の一部処理を専用設計の IC (ASIC) で行うため、本システムでもそれを流用することにする。したがって、信号処理系は、ASIC を搭載した基板 (ASIC 基板) と、A/D 変換の後半部の処理を行うための FPGA を搭載した基板 (VidepFPGA 基板) から構成される。ASIC 基板、VideoFPGA 基板ともに阪大から支給されたものである。

ASIC には、同一の回路が４系統入っており、４つの入力をパラレルに処理できるよう

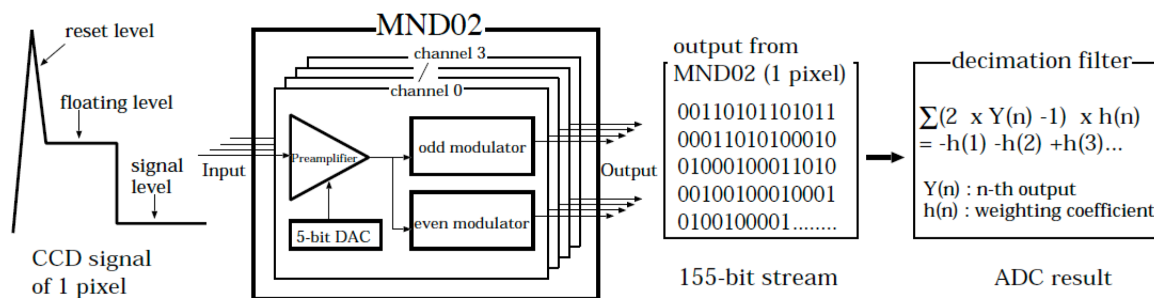


図 3.2: 信号処理の模式図。入力信号はプリアンプにより最大約 10 倍に増幅される。MND02 のダイナミックレンジを最大限有効に使用するため、5-bit DAC により signal level にオフセットを与える。次に ΔΣ モジュレータが 1 ピクセル分のアアログ信号をデジタル 155-bit 列に変換する [12]。

になっている。この 4 系統の回路は、それぞれ chain0,chain1,chain2,chain3 と呼ばれる。

ASIC の各系統は、ヘッド基板から CCD 出力信号を受け取り、その増幅 (最大約 10 倍) とオフセットを行うとともに、ΔΣ 変換を用いた A/D 変換の前半部の処理を行う。A/D 変換では、CCD 出力の標準的な信号処理方法に則り、CCD 出力の floating level と signal level の相関多重サンプリングを行い、その差を取ることで画素毎の電荷量に相当する信号を得ている。サンプリングや A/D 変換に必要なクロックは、制御系から CCD 駆動波形と同期して供給される。なお、1 ピクセル分の信号処理に 2 ピクセル分の時間がかかるため、1 系統に付き 2 つの ΔΣ モジュレータを内蔵していて、偶数ピクセルと奇数ピクセルを別々のモジュレータで処理するようにしている。そのため、ASIC からの出力には、偶数ピクセルと奇数ピクセルの間で系統的なオフセットが乗る事があるが、これはデータ処理の際にダークフレームを差し引きすることで取り除かれる。

ASIC 基板の出力は、videoFPGA 基板に送られ、 そこで ΔΣ 変換の後半部の処理 (デシメーション処理) が行われる。また、デシメーション処理後の出力は、VideoFPGA 内のロジックにより 4 系統の内 2 系統（chain1,chain3）は出力値が 0 となるように設定されている。

これら信号処理系のうち、CCD からのアナログ出力を受け取る ASIC 基板は真空槽内に設置される。

3.2.4　制御部

制御系は、MIO ボードと呼ばれる基板と、それを制御する計算機からなる。MIO ボードは SXI チームから支給されたものである。MIO ボードでは、駆動系や信号処理系が必要とするタイミング信号を供給するとともに、信号処理系からの出力信号をバッファして計算機に送り出す。タイミング信号は、マイクロコードに従ってシーケンサで生成される。シーケンサは、FPGA 上に実装されており、これを UserFPGA と読んでいる。UserFPGA ではこの他に、デシメーションフィルタからのデータに属性情報（PCODE）

を付け加え SpWFPGA 配下の SD-RAM に格納する。

また、MIO ボードは、計算機とのインタフェースに SpaceWire（SpW）を用いる。SpW とは宇宙機用データ通信インタフェース規格および通信プロトコルのひとつであり、現在標準的な宇宙機の規格となりつつある。このスペースワイアインタフェースは SpWFPGA に実装されているが、市販の PC はスペースワイアのインタフェースを持っていない。そのため、TCP/IP との間のプロトコル変換を行う SpW2GbE を介して計算機とのインタフェースをとっている。計算機では、模擬ソフト（sxiDRsim）を介し CCD の駆動およびデータ取得に関する様々な指令を送る。

3.2.5　真空系および冷却系

CCD 素子は、熱雑音に起因する暗電流を減らすため、冷却して使用する必要がある。冷却温度は、素子の性能と駆動方法によって異なるが、通常マイナス数十度から-120 ℃に冷却する必要がある。

本システムでは、パルスチューブ冷凍機を用い、CCD と熱接触しているコールドプレートを介し CCD を冷却する。また、CCD の温度を安定に保つため、温調器とヒーターによる温度制御も合わせて行う。基本的に、パルスチューブ冷凍機は一定出力で運転し、細かな温度制御はヒーターで行う。ヒーターによる温度制御は、暗電流が問題にならない温度域なら 1 ℃程度の安定度があれば十分である。

真空系は、冷却した CCD への結露を防ぐために必要となるが、実験目的によっては、大気によって吸収されやすい軟 X 線や電子線の照射が必要なこともあり、その場合にも真空系が必要となる。本システムでは、ロータリーポンプとターボ分子ポンプをもちい、CCD と信号処理系を設置した真空槽とフレキシブルチューブでつないで、真空排気を行う。

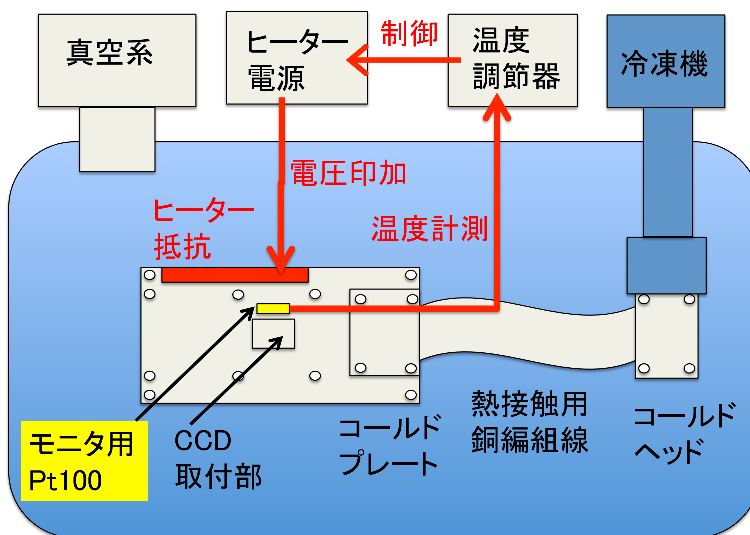


図 3.3: 冷却系および真空系の概念図。

3.3　システムの構築

CCD 評価システムのようなシステムを組み上げげる場合、個々の構成要素が正常に動作してもシステム全体として所定の性能が発揮できるとは限らない。ここでは、システムとして総合性能が発揮できるために特に気をつけた点として、グラウンドとシールドについて述べる。その後、実際にシステムを構築する際に遭遇したトラブルとその対処方法について説明する。グラウンド設計に当っては、いくつかのグラウンドを区別する必要がある。本システムでは、大きく二つのグラウンドを用意した。容量の大きいフレームグラウンドと電子回路の動作の基準電位となるシグナルグラウンドの二つである。シグナルグラウンドは、アナログ回路の動作の基準電位であるアナロググラウンドとデジタル回路の動作の基準電位であるデジタルグラウンドから成る。本評価システムのグラウンド系統図を図 3.4 に示す。このグラウンド系統図の設計において留意した点を以下に説明する。

グラウンドの分割 クリーン・グラウンドであるシグナルグラウンドとダーティー・グラウンドであるフレームグラウンドを明確に区別してシステムのグラウンド設計を行った。システムの性能に直結するシグナル・グラウンドは外部電源からの雑音が上流信号の基板に入り込まないように電源の根元でフレームグラウンドに落としている。ルーターからの外来雑音が心配される SpW2GbE に置いても同様にしてある。フレームグラウンドは実験室に接地してある。

アナログラインへのシールド装着 耐雑音性の弱いと思われるアナログラインはできる限り配線は短く、かつシールド処理を施した。これにより、実験室環境で生じる放射ノイズの混入を抑えている。他機関ではここにシールドをしないでシステムが十分な性能が出ていることが報告されている。これより、ヘッド基板と ASIC 基板の間のケーブルはシールドの影響が弱いことが経験から推測されるので、シールドの両端は当初通りシグナル・グラウンドに落としたままにしている。

また、システム構築に当たって遭遇したトラブルとその対処方法は以下の通りである。

モニタ配線をオシロスコープに繋がない ASIC のゲインやオフセットの調整のためにモニタ用の配線を真空槽内に配置している。ASIC 基板から単純に引き廻して真空槽外のオシロスコープまでモニタ配線を繋ぐ場合、ランダム雑音や周期的なノイズが生じ アナログ品質に大きな影響を与えていることが確認された。これは、長い配線によって生じた寄生容量による熱雑音、モニタ配線に外来雑音が混入してアナログ回路に悪さをしている、グランドループによってノイズが混入している可能性が考えられる。よって、データ取得時にはモニタ配線をオシロスコープに繋がないことでこのような可能性を排除した。

デジタルラインへのバンドルシールドの装着 デジタルライン（LVDS）のケーブルを一括シールド処理し、フレームグラウンド（ケース）と一体化した遮蔽を形成するためシールド両端をフレームグラウンドに落とした。これは、デジタルラインの引き廻し方によって出力雑音が変化したため、デジタルラインに乗ったコモンモード雑

音が LVDS 素子を突き抜けてアナログ部に干渉していることを疑ったためである。デジタルデータには処置前からデータ化け等の不具合は見られなかったが、処置により出力アナログ雑音は低レベルで安定した。

以上の対策を施すことでシステムの読み出し雑音を十分に小さくすることができた。

以上のようにシステム設計上の注意点を考慮し、また、システム構築上のトラブルにも対処することで、目的とする性能を概ね達成することができた。図 3.5 にグラウンド系統図の修正版を示す。

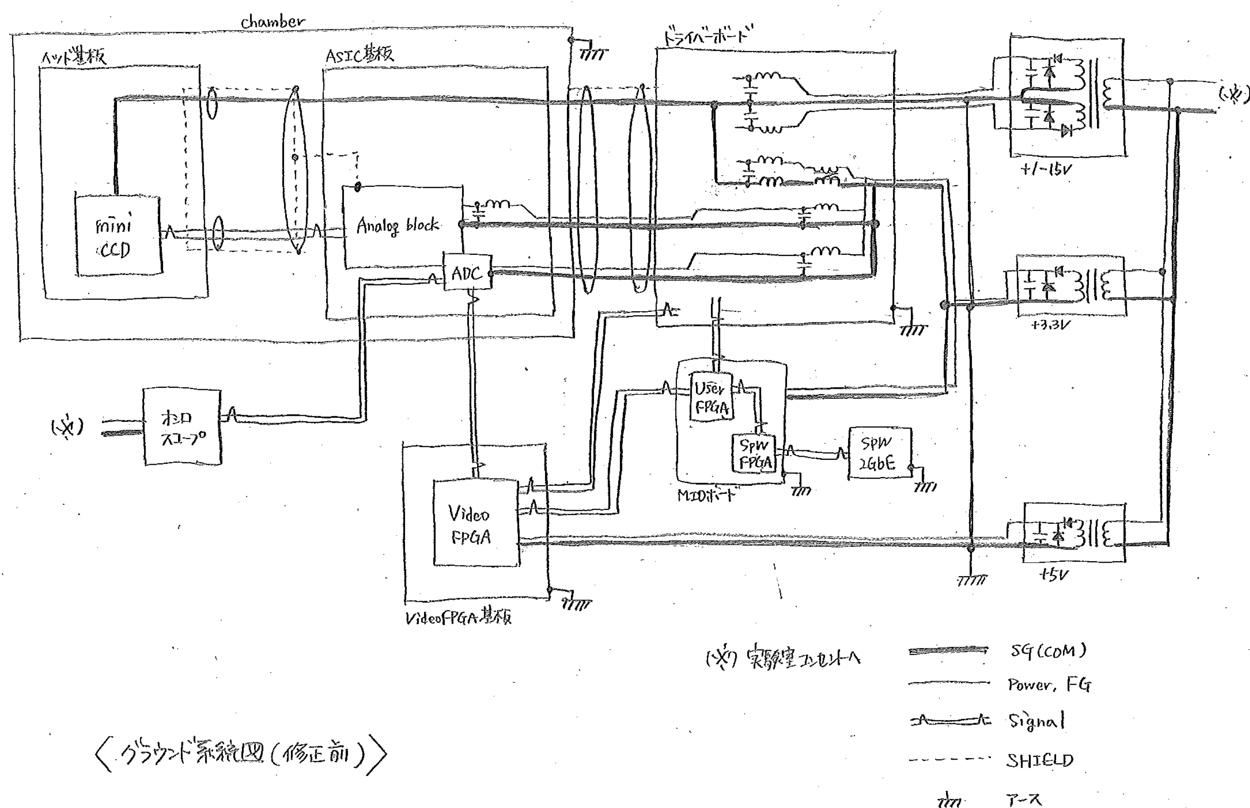


図 3.4: グラウンド系統図

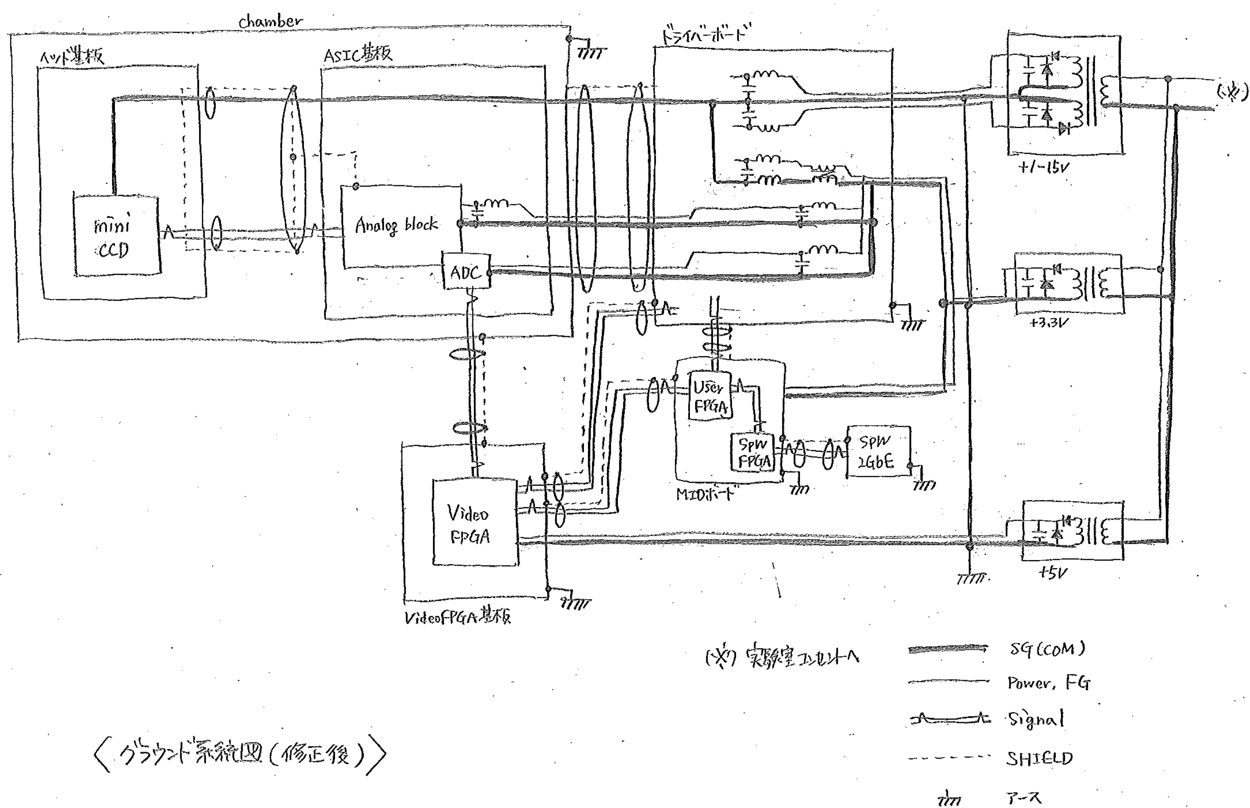


図 3.5: グラウンド系統図（修正版）

第4章　性能評価試験

本章では、前章で構築したCCD評価システムの動作試験を行い、その性能について評価する。評価は段階的に行い、最終的にはCCDをつないで-120 ℃に冷却し、^{55}Fe線源からのKX線（5.9 keV）を照射してシステム全体としての性能の評価を行った。

4.1　使用する素子

評価システムの動作試験には、浜松ホトニクス製のCCD、S11745-0637(X) を使用した。これは、ホール転送タイプの背面照射型CCDで、SXIで使用するものと基本的に同じ構造を持つもののピクセル数のみが少ないCCDである。主な仕様および特徴を以下に列挙する [13]。

- 駆動電極として二相方式を採用したフレームトランスファー型CCDイメージセンサで、チップサイズは 7.680 $mm(H) \times 6.114\ mm(V)$、ピクセル数は $320(H) \times 512(V)$ である。
- 撮像領域のピクセルサイズは 24μm 角であるが、蓄積領域ではピクセルサイズが小さくなっている。
- フレームトランスファー型のCCDであり、256行の受光部 (撮像領域) と256行の蓄積部 (蓄積領域) からなる2つの垂直シフトレジスタと1つの水平シフトレジスタおよび出力部より構成されている。
- 電極面と反対側で受光する裏面照射型のため、低エネルギー側の検出効率が高く、また空乏層も 200μm と厚いため高エネルギー側でも高い検出効率を実現している。
- 裏面照射型のため、動作時には完全空乏化しており、中性領域は存在しない。
- 裏面には、可視光遮断のため 100 nm 厚のアルミ蒸着が施されている。
- 読み出しノードは一つのみで、CCDの電荷検出の方式としてFDAを採用している。
- パッケージはセラミックパッケージを使用。
- 温度センサは実装されていない。

S11745-0637(X) の出力は１ノードのみであるが、ASICは４ノード分の信号を処理できるので、今回の評価試験ではひとつの出力をヘッド基板上で４つに分岐させASICに

入力することにする。今後、S11745-0637(X) のことを、SXI 用 CCD と同等であるがピクセルが少ないという意味で、miniCCD と呼ぶことにする。図 4.1 に S11745-0637(X) の写真をのせる。

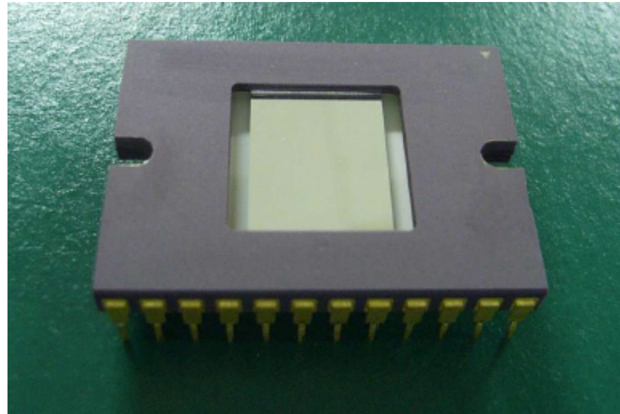


図 4.1: miniCCD（S11745-0637(X)）

4.2　駆動方法とフレームデータ

miniCCD は、撮像領域と蓄積領域をもつフレームトランスファー型の CCD であるが、本試験では撮像領域と蓄積領域の区別をせず、全 320×512 ピクセルを逐次読み出すフルフレームトランスファー方式で駆動する。これは、フルフレームトランスファ方式の方が駆動が簡便になることと、本システムの評価にはどちらの駆動方式でも同等に使える事による。

また、CCD チップ上でビンまとめを行い、2×2 画素の信号を１画素に加算して読み出す（ビニング動作）。これは、空乏層の厚い背面照射型 CCD では、背面付近で光電吸収されたX線の電子雲（正孔雲）がピクセルサイズ以上に広がるためで、CCD チップ上でビニング動作をすることで実効的なピクセルサイズを 48μm 角とし、電子雲が最大でも 2×2 ピクセル内に収まるようにしている。「あすか」衛星や「すざく」衛星など、現在X線衛星で広く採用されているデータ処理方法（グレード法）では、電子雲が 2×2 ピクセル内に収まることを前提としている。ビニング動作により、電子雲が 2×2 ピクセルに収まるようになり、グレード法によるデータ解析を効果的に行うことが可能になる。同じデータ解析方法が使える事で、解析手法に違いによる影響を排除することができ、システム評価には好都合である。なお、SXI でも 2×2 のビニングを行うことになっている。

また、転送および読み出しにおけるノイズ評価のために縦方向、横方向ともにピクセル数以上の読み出し (over-clocking) を行っている。

CCD 駆動信号の時間的な遷移を表したタイミングは、SXI の開発向けに使用しているフレームトランスファ用のものをベースに、本評価のためにフルフレームトランスファかつ miniCCD 仕様に改修した。図 4.2 にタイミングチャートをのせる。各駆動信号の電圧値は、やはり SXI の開発のために、miniCCD 用に設定した電圧値を用いた。表 4.1 に

設定した電圧値を示す。また、図 4.3 にこれらの駆動動作によって得られるデータフォーマットを示す。データフォーマット上の HUC 領域、HOC 領域、VOC 領域がノイズ評価を行うための over-clocking 領域である。

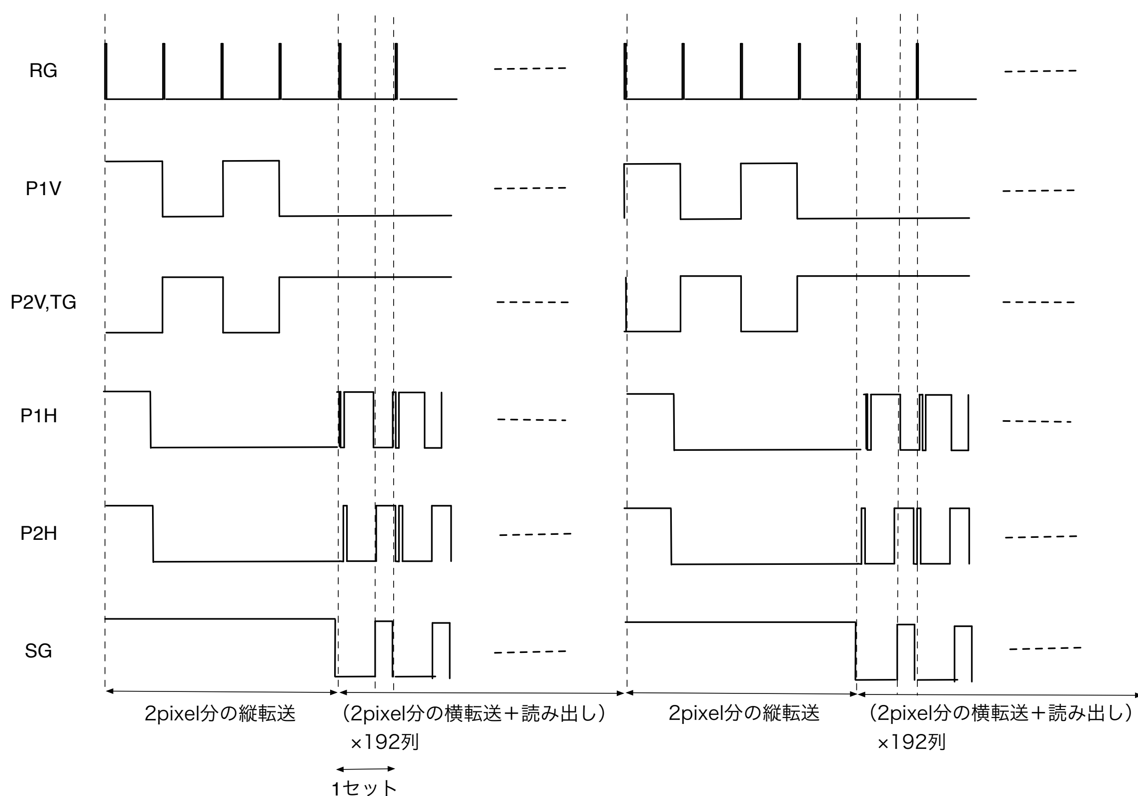


図 4.2: タイミングチャート。miniCCD に印加したクロック信号の時間的遷移を表している。この図内では 2 行分の読み出しを行っており、一枚のフレームイメージを得るためには 272 行分繰り返す必要がある。

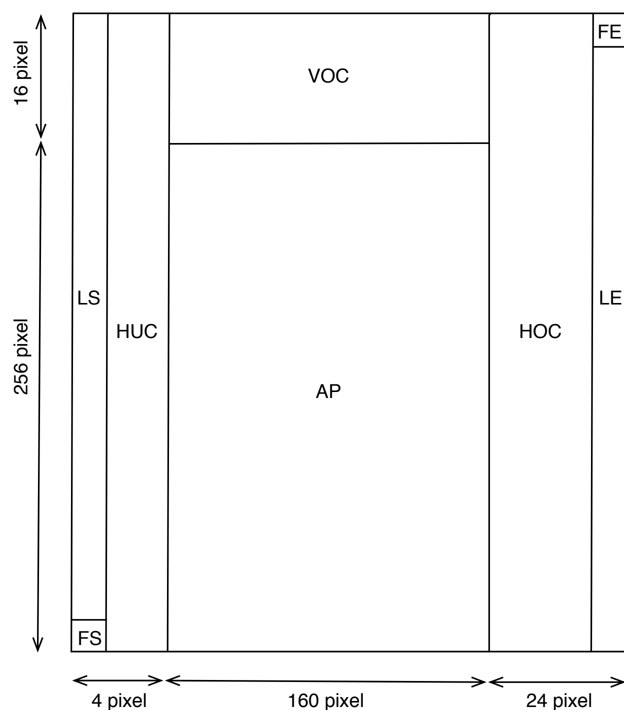


図 4.3: 出力データフォーマット。AP 領域は撮像領域を表し、それ以外の領域はすべて over-clocking 領域である。左と下の数字は画素数を表す。

表 4.1: 設定電圧値

項目	電圧値 [V]
OD 電圧	-20
RD 電圧	-12
OG 電圧	-5
BB 電圧	+30
ISH 電圧	-12
ISV 電圧	-12
PV 電圧	+3/-5
PH 電圧	+3/-3
SG 電圧	+7/-5
RG 電圧	+5/-6
TG 電圧	+3/-5

4.3　結果

評価システム単体での性能と、miniCCD を接続しての総合性能の両方の評価を行った。以下の試験では、読み出し速度はすべて 69.4 kHz に設定とした。

4.3.1　CCD 未接続での性能評価

この評価では、CCD の駆動読み出し回路系のノイズレベルの評価をおこなう。したがって、真空排気系や冷却系は動作させていない。

評価に先立って、まず駆動信号が正常に出力されているかどうか、機能確認を行った。確認は、ヘッド基板上の CCD 実装用ソケットのピンで駆動信号波形をオシロスコープで観察するとともに、MIO ボードで収集される HK データにおいても確認を行った。HK とは、システム内各部の温度情報および駆動信号の電圧情報のことである。

HK データからは DAC 設定値通りの値を得ることができたが、ソケットでの観察により駆動信号に想定以上のリンギングがあることが確認された。この原因を突き止めるため駆動信号の経路に沿って波形をチェックしていくと、ドライバーボード上の DAC で制御用クロックの立ち上がり／立ち下がりに伴ってリンギングが生じていることが分かった。これを改修するにはドライバーボードのパターン変更が必要で時間を要するため、今回は改修を見送り現状のままで評価を進めた。

駆動回路系が（上記リンギング問題を除き）正常に機能していることが確認できたため、次にシステムノイズの評価を行った。システムノイズは CCD 未接続時の読み出しノイズのことである。これには、CCD を接続しない状態でシステムを動作させて得られたフレームイメージを用いた。得られたフレームイメージの波高値のヒストグラムを奇数列群 (odd) と偶数列群 (even) それぞれに対し作成した。作成したヒストグラムを図 4.4 に示す。これを、ガウシアンでフィッティングすると標準偏差が約 4 ADU r.m.s. になる。システムノイズは

$$\text{（システムノイズ）} = \text{(全領域の標準偏差）} \times \frac{\text{（ゲイン）}}{W} \tag{4.1}$$

と定義されるので、システムノイズは電子個数換算で約 6 e^- r.m.s. になることが分かった。ゲインは ADU １つに対応するエネルギー量のことで (ゲインは後述の 4.3.3 節で求めた値を使った。)、W は１対の電子正孔対を作るのに必要な平均エネルギーのことである（シリコンでは、3.65 eV)。表 4.2 に得られた結果をまとめる。

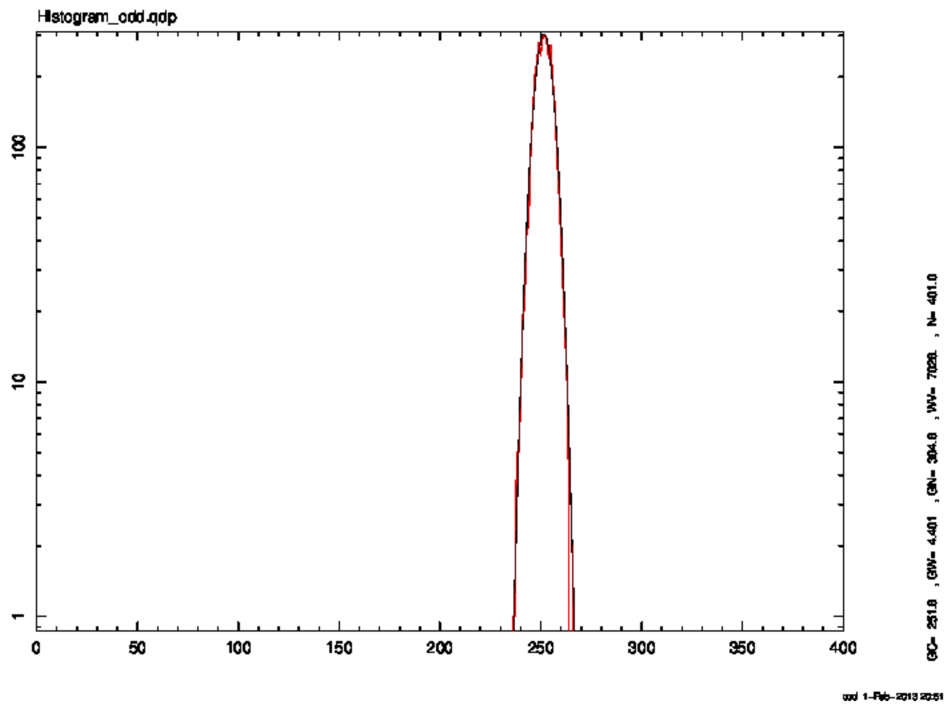


図 4.4: フレームイメージの波高値のヒストグラム（chain0/odd）。横軸は ADU で、縦軸はカウント数である。CCD 未接続時のフレームイメージを用いた。

表 4.2: ガウス関数でのフィッティング結果とシステムノイズ

	odd	even
標準偏差 [ADU r.m.s.]	4.26	3.93
システムノイズ [ADU r.m.s.]	6.19	5.71

4.3.2 CCD 素子の機能確認

CCD を接続した総合性能評価に進む前に、CCD が正常に機能しているかどうかの確認を行った。これは、CCD は静電気に対してきわめて脆弱で、ハンドリングの際に故障することがかなりの確率であるからである。

機能確認は、暗撮像 (真空槽のフタを閉じ、CCD に可視光が入射しない状態での撮像) と明撮像 (真空槽のフタを開け、CCD に可視光が入射する状態での撮像) を行い、それぞれ CCD 出力信号波形をオシロスコープで確認することで行った。撮像は、CCD を冷却せずに大気中でおこなった。

暗撮像では撮像領域で出力が飽和し、明撮像では撮像領域の加え HUC(horizontally under-clocked) 領域でも飽和していることがオシロスコープでのモニターで確認できた。これは、暗撮像では常温で撮像したために熱励起雑音により飽和し、一方、明撮像では熱励起雑音に加え光に反応した結果ブルーミングが起こり、HUC 領域まで飽和してしまったと考えられる。ブルーミングとは、一つのピクセルに大量の光が入射した結果、大量に生じたキャリアが転送電極で作られたポテンシャル障壁を乗り越え隣のピクセルへ侵入する現象である。生じたキャリアが非常に大量の場合、隣のピクセルからもあふれ、さらに隣のピクセルへキャリアが侵入していくことになる。今回見られた現象は、可視光遮断膜のはっていない蓄積領域で発生したキャリアが、蓄積領域をあふれて水平転送路まで侵入してきたことが原因であると考えられる。このことから、素子が光に反応していることがわかり、正常に機能していることが確認できた。

4.3.3　CCD を接続しての総合性能評価

最後に、読み出しノイズ、暗電流、エネルギー分解能等の総合性能を評価するため、miniCCD を接続し、冷却した CCD に X 線を照射したフレームイメージを取得した。X 線源としては、^{55}Fe 密封線源から放射される 5.9 keV と 6.5 keV の特性 X 線を使用した。使用した密封線源の放射強度は、2012 年 9 月時点で 283.4 kBq だった。

真空系および冷却系の動作確認を行った。温調器による PID 制御で毎分 2 ℃ずつ温度が下がるよう設定し、約二時間でコールドプレートが目標温度である-120 ℃に到達した。その後 ±0.1 ℃で数時間温度制御をし続けた。真空系については、アウトガスのため真空度は $3.0{\times}10^{-3}$ Torr と上がらないものの、評価には影響ないのでそのまま進めた。

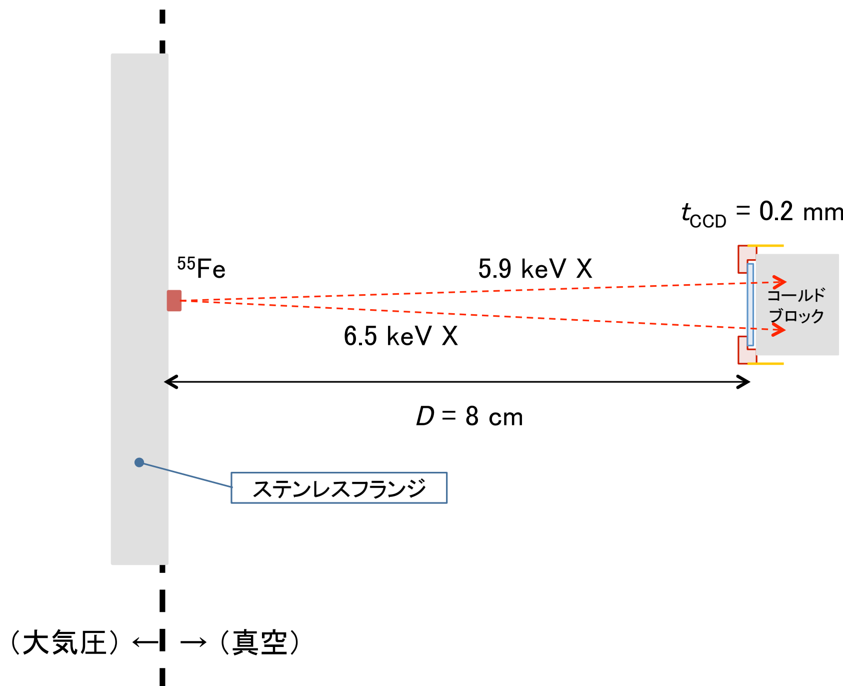


図 4.5: 照射系の概略図。CCD は真空槽内に配置され、コールドブロックを介し冷却される。コールドブロックは-120 ℃に温度制御されたコールドプレートにねじ止めされ熱接触している。使用した線源は真空中でも使用可能で、カプトンテープでステンレスフランジに固定されている。miniCCD には、5.9 keV と 6.5 keV の KX 線が照射される。

図 4.5 に試験系の概略図を示す。miniCCD 素子はヘッド基板に実装されているソケットに装着される。ヘッド基板およびソケットは素子を冷却するために真中に穴が開いた構造をしており、素子はその穴を利用しコールドブロックを介し冷却される。コールドブロックは-120 ℃に温度制御されているコールドプレートにねじ止めされ熱接触している。^{55}Fe 線源は、ステンレスフランジにカプトンテープで固定され、真空槽内に置かれている。線源は素子のちょうど真上に配置されており、素子と線源の間の距離は 8 cm 程度である。

冷却撮像データを取得する前に、シグナルレベルとフローティングレベルの電圧差が $\Delta\Sigma$ モジュレーターの入力範囲に合うように調整を行った。オシロスコープで出力波形を観察しながら、ASIC プリアンプのゲインおよびオフセットを調整した。ゲイン、オフセットはモジュレーターの入力範囲内でダイナミックレンジを最大限有効に使えるよう設定した。オフセットとゲインは、それぞれ-540 mV、10 倍とした。また、オシロスコープでの観察より、リセットパルス、フローティングレベル、シグナルレベルが適正であることが確認でき、期待される正常な信号波形を得ることができた。

システムを 3 時間連続で運転させ、約 2700 枚のフレームイメージを取得した。これより、システムが安定にデータ収集を行えることが確認できた。得られたフレームイメージの中から一枚を図 4.6 に示す。図 4.7 は、図 4.6 を X 線イベントが分かりやすいようにコントラストを調整したフレームイメージである。フレームイメージより X 線イベントに縦流れや横流れは見られず、駆動信号に問題がなかったことがわかる。

以下得られたフレームイメージを用い、それぞれ解析を行い必要な性能値を調べる。

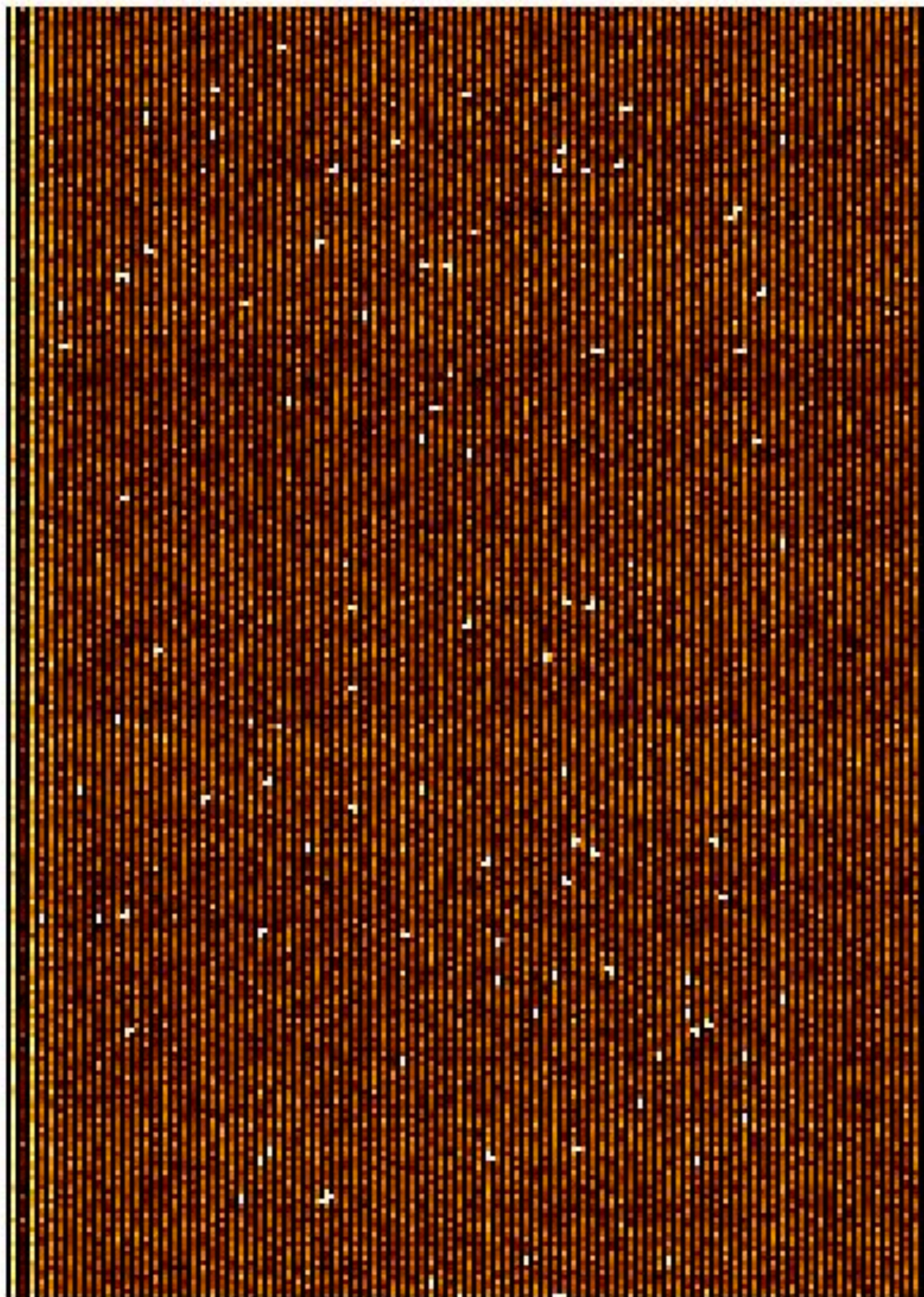


図 4.6: 冷却した CCD に X 線を照射したフレームイメージ。X 線には、^{55}Fe 線源から照射される 5.9 keV と 6.5 keV の特性 X 線を使用した。色が濃いところが波高値の低い所、薄いところが波高値の高いところを示している。また、AP 領域（中央部分）と HOC 領域（右側）の波高値に差が見えないことより、CCD が十分に冷却されていることが分かる。

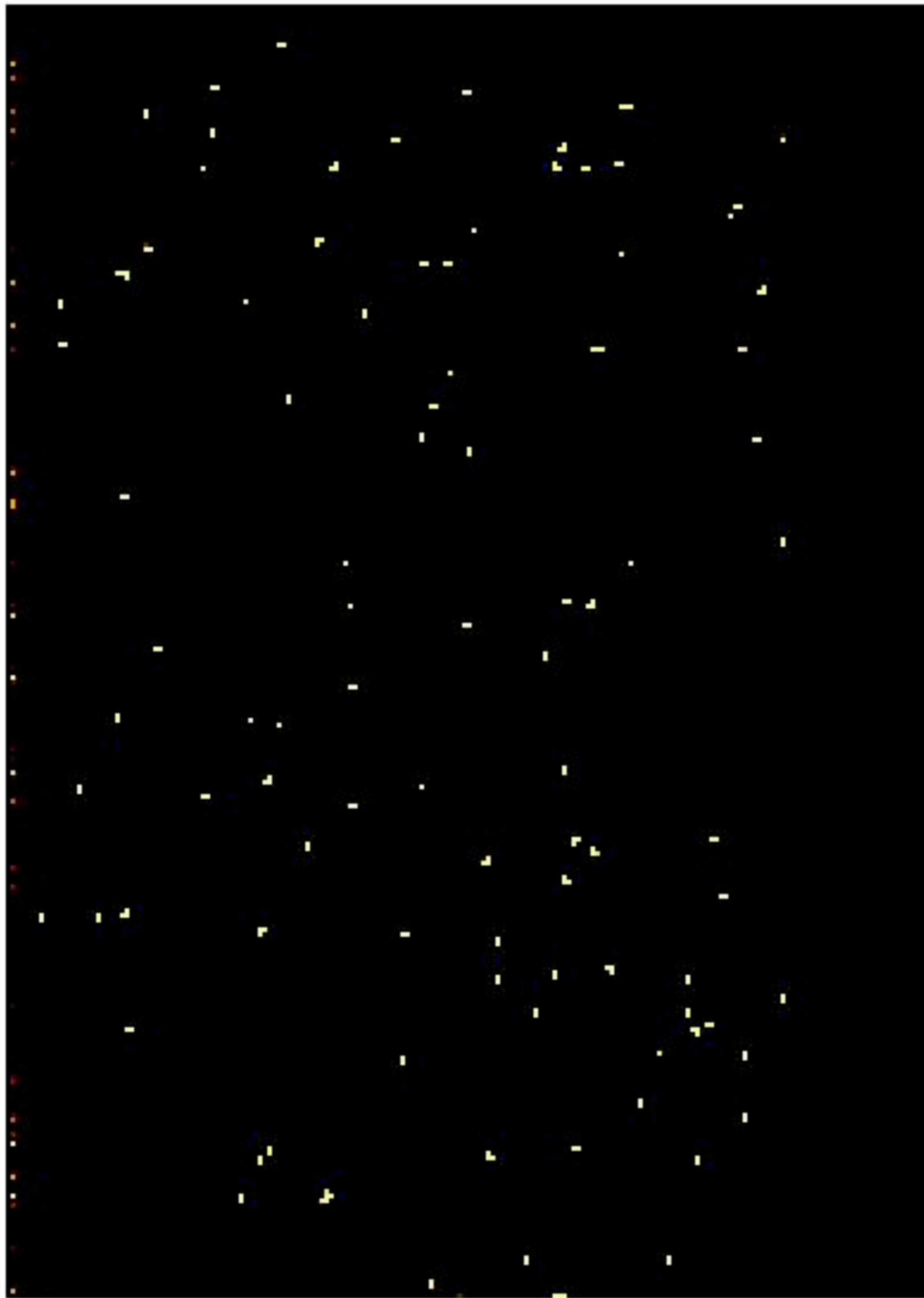


図 4.7: 図 4.6 のコントラストを調整した図。明るい画素は X 線が入射した位置を示す。X 線イベントに電荷流れは見られない。

4.3.3.1　読み出し雑音と暗電荷

最初に、読み出しノイズの評価を行う。読み出しノイズは、CCD の出力信号を読み出す際に生じる雑音のことで、フレームイメージの HOC 領域には暗電流が存在しないことから、この領域の波高値の標準偏差から推定することができる。そこで、任意の 1 枚のフレームデータを取り、HOC 領域の分布を調べた。図 4.8 に、フレームイメージの HOC 領域のヒストグラムを示す。これを、ガウシアンでフィッティングと（chain0 の奇数列群で）標準偏差が 4.79 ADU r.m.s. になる。読み出しノイズは

$$（読み出しノイズ）= (HOC \text{ 領域の標準偏差}) \times \frac{（ゲイン）}{W} \tag{4.2}$$

と定義されるので、読み出しノイズは電子個数換算で約 7 e^- r.m.s. になることが分かった。(ゲインは後述の 4.3.3 節で求めた値を使った。）表 4.3 に得られた結果をまとめる。

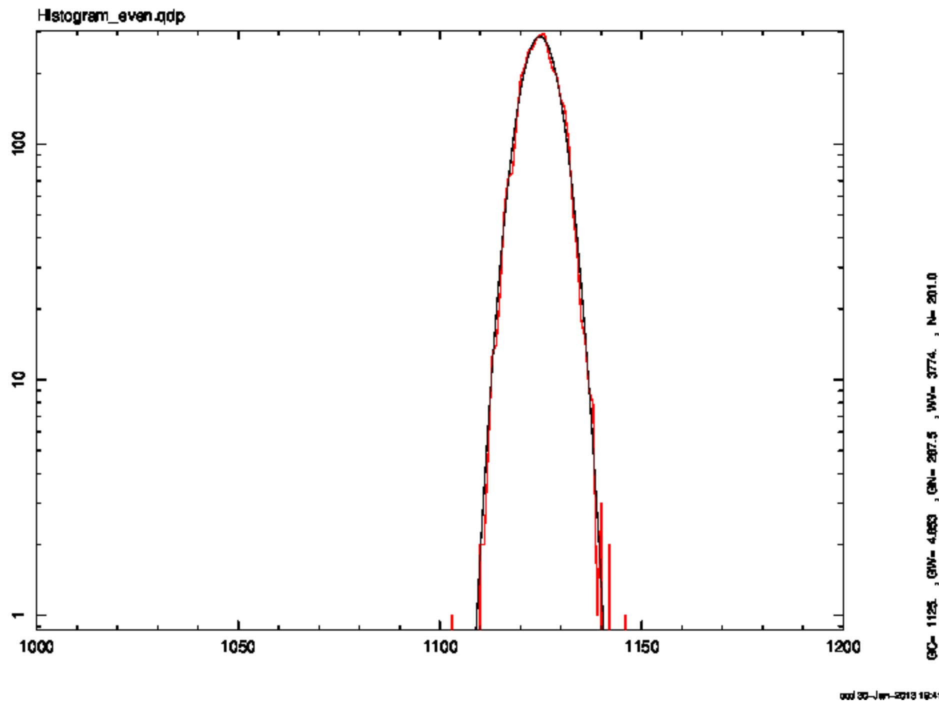


図 4.8: HOC 領域のヒストグラム（chain0/even）。冷却した CCD に X 線を照射したフレームイメージから一枚を用いた。横軸は ADU で、縦軸はカウント数である。ガウシアンの幅は 4.54 ADU r.m.s であった。

表 4.3: ガウス関数でのフィッティング結果および読み出しノイズ

	chain0		chain2	
	odd	even	odd	even
標準偏差 [ADU r.m.s.]	4.79	4.54	4.50	4.58
読み出しノイズ [e^-]	6.96	6.59	6.61	6.73

つぎに、暗電流を求めた。CCD では、ピクセルに発生する単位時間当たりの電荷として暗電流を定義する。読み出しノイズと同様に任意のフレームイメージを一枚用いて暗電流の評価を行った。暗電流は、AP 領域のダークレベルの中央値と VOC (vertically over-clocked) 領域の中央値の差として計算できる。フレームイメージの AP 領域のダークレベルおよび VOC 領域の波高値のヒストグラフを図 4.9、図 4.10 に示す。これを、ガウシアンでフィッティングすると AP 領域のダークレベルの平均波高値と VOC 領域の平均波高値の差が約 1 ADU になる。暗電流は、

$$
\text{(暗電流)} = \frac{(AP\ \text{領域のダークレベルの平均波高値}) - (VOC\ \text{領域の平均波高値})}{\text{(露光時間)}} \times \frac{\text{(ゲイン)}}{W} \tag{4.3}
$$

と定義されるので、暗電流が電子個数換算で約 1 e^{-}/4pixel/4sec になることが分かった。(ゲインは後述の 4.3.3 節で求めた値を使った。）表 4.4 に得られた結果をまとめる。

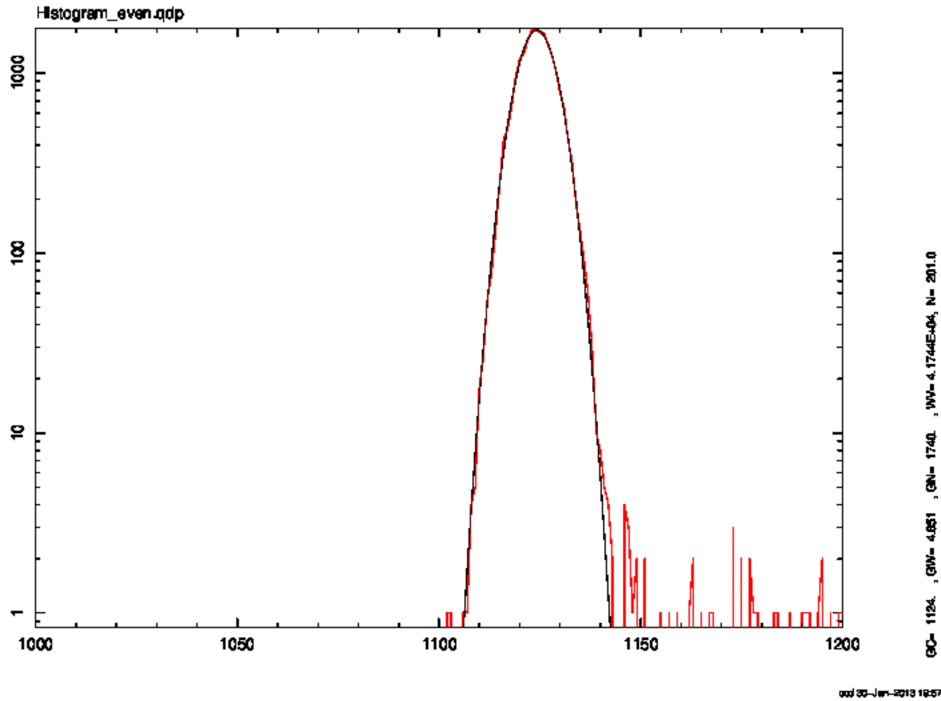


図 4.9: AP 領域のダークレベルのヒストグラム（chain0/even）。冷却した CCD に X 線を照射したフレームイメージから一枚を用いて作成。横軸は ADU で、縦軸はカウント数である。ピークの中心値は 1124.48 ADU であった。

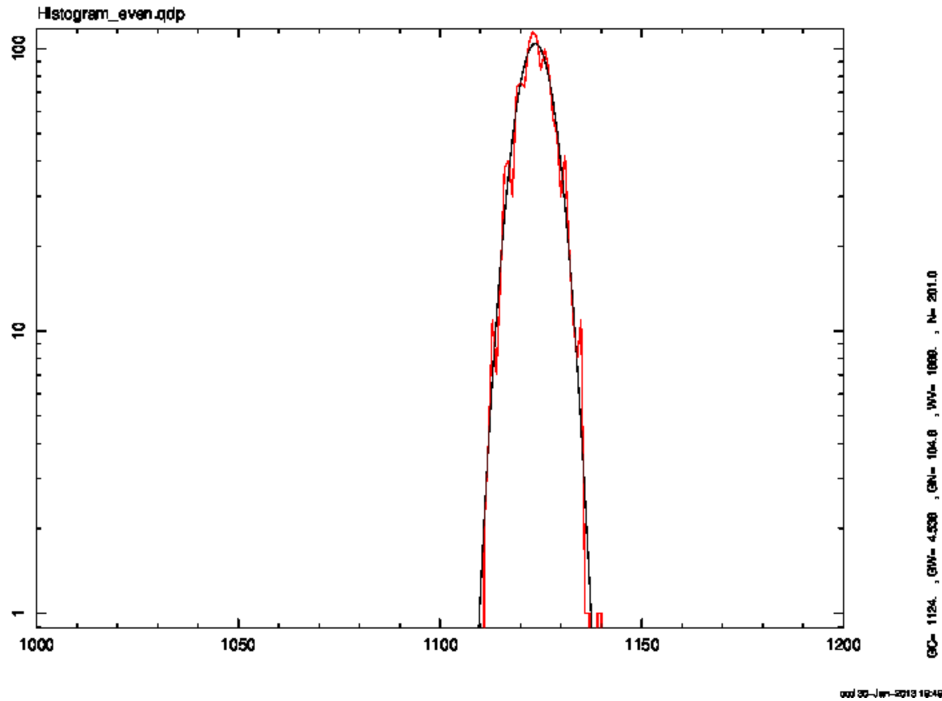


図 4.10: VOC 領域のヒストグラム（chain0/even）。冷却した CCD に X 線を照射したフレームイメージから一枚を用いて作成。横軸は ADU で、縦軸はカウント数である。ピークの中心値は 1123.69 ADU であった。

表 4.4: ガウス関数でのフィッティング結果および暗電流

	chain0		chain2	
	odd	even	odd	even
AP 領域のダークレベルの平均波高値 [ADU]	1533.31	1124.48	1152.79	1328.93
VOC 領域の平均波高値 [ADU]	1533.20	1123.69	1151.28	1328.65
暗電流 [e^-/4pixel/4sec]	0.16	1.15	2.22	0.41

4.3.3.2 エネルギー分解能

次にエネルギー分解能の評価を行った。

まず、CCD からのフレームイメージには、ピクセル毎の暗電流の違い等により、ある固定パターンが見られる事がある。このような固定パターンを取り除くため、検出対象となる信号（この場合は、X線）が入射しない状態でのフレームイメージを取得し、まずこれを差し引いてからデータ解析を行う、という方法とみられる。この、検出対象となる信号が入射していないフレームイメージをダークイメージという。ランダムノイズ低減のため、複数のフレームイメージを平均してダークイメージを作ることが多い。本評価試験では、32 枚のフレームイメージを平均してダークイメージを作成した。

エネルギー分解能は、55Fe 線源で得られた輝線スペクトルの幅として定義する。したがって、フレームデータから 55Fe 線源の特性X線のエネルギースペクトルを作る必要がある。これは、次のようにして行った。

まず、各フレームデータから先に求めたダークイメージを引き算し、ピクセル毎の特性の違いに由来する固定パターンを取り除いた。次に、X線イベントをフレームデータから抽出し、グレードに従って波高値を足し上げ（グレード法)、そのヒストグラムを作成した。これがエネルギースペクトルになる。最後に、ガウス関数を当てはめることで輝線の幅を評価し、エネルギー分解能を算出した。

以下、X線イベントの抽出とグレード法について、説明する。

CCD データ解析におけるイベントは、中心ピクセルの波高値がある一定値の中にはいていて、周囲８ピクセルよりも中心ピクセルの波高値の方が高い、という２つの条件を満たす電荷の塊として定義される。中心ピクセルの波高値の範囲を定義するスレッショルドをイベントスレッショルドという。このイベントには、X線によるものもあれば、荷電粒子やノイズの揺らぎによるものも含まれる。そこで、周囲８ピクセルの波高値分布、とくにあるスレッショルド（スプリットスレッショルド）を基準とした波高値分布をしらべ、X 線によると考えられるイベントのみ取り出す方法が取られる。X線イベントによる電荷の広がりは（中心ピクセルを含め）最大でも４ピクセルなので、それ以上電荷が広がっている場合は、荷電粒子やノイズによるものとして除外できる。これをグレード法と呼び、周囲８ピクセルの電荷分布のパターンによりグレード（通常、０から７の数字が割り当てられる）が割り当てられる。

このグレード法を適用するにあたり、まず読み出しノイズから、イベントスレッショルドとスプリットスレッショルドを決めた。スプリットスレッショルドは、読み出しノイズの 3 倍とした。これにより、ノイズを電荷の漏れ出しと誤認する可能性は 99.5 %の確率で除外できる。また、イベントスレッショルドはスプリットスレッショルドの 3 倍とした。イベントスレッショルドは、ターゲットとした X 線エネルギーに対応した波高値の 1/4 以下で、読み出しノイズより十分大きければ、任意の値を選ぶことができる。

読み出しノイズは、前述のようにフレームイメージの HOC 領域の波高値のヒストグラムから求めると約 5 ADU r.m.s. である。これより、イベントスレッショルドとスプリットスレッショルドを、それぞれ 45 ADU と 15 ADU に設定しイベント抽出を行った。今回は、ベストなパフォーマンスを得るため、グレード０（シングルイベント）のみを用いて解析を行った。これは、X線の光電吸収により生成された電荷が１ピクセルに収まってい

る場合に対応する。図 4.11 にシングルイベントの波高値のヒストグラムを示す。これをガウシアンでフィッティングすると、（chain0）の MnKα（5.9 keV）の中央値が 1114 ADU、標準偏差が 15.49 ADU r.m.s. になる。ゲイン（G）は、

$$G = \frac{E（eV）}{中央値（ADU）} \tag{4.4}$$

と定義されるので、MnKα を用いると 5.30 eV/ch になることがわかった。

また、エネルギー分解能は、

$$\Delta\ E = 2.35 \times G \times（標準偏差） \tag{4.5}$$

と定義されるので、5.9 keV の X 線に対するエネルギー分解能は FWHM で 193 eV になることがわかった。

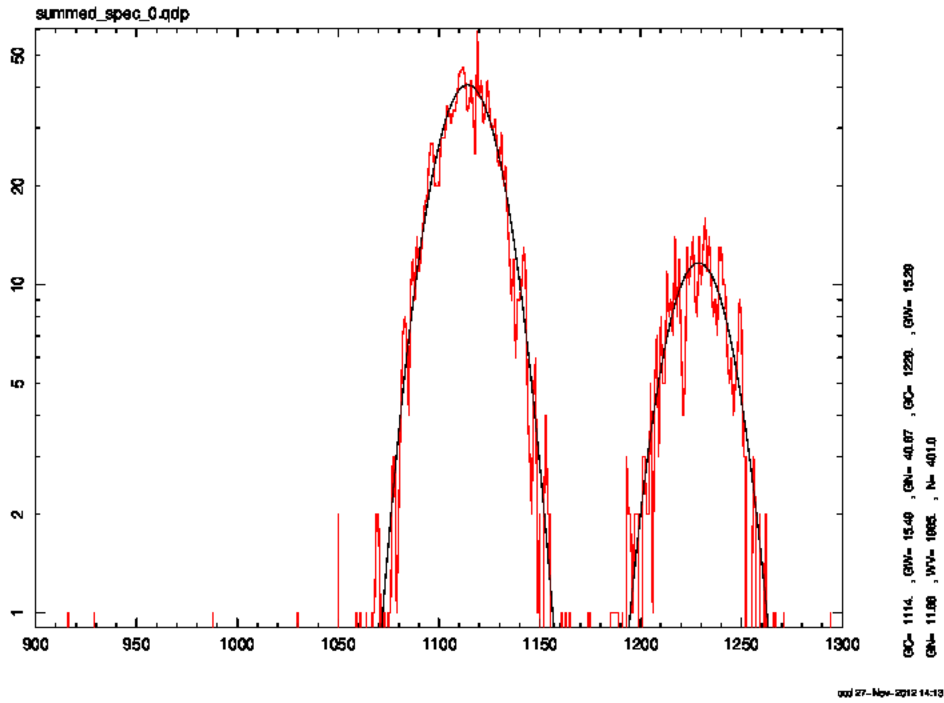


図 4.11: Grade0 のスペクトルファイル（chain0）。横軸が ADU、縦軸がカウント数である。冷却した CCD に X 線を照射したフレームイメージからダークイメージを差し引いたイメージ約 2700 枚を用いてイベント抽出を行って作成。中央に見える大きなピークが 5.9 keV の X 線によるもの、大きなピークの右側に見える少し小さなピークが 6.5 keV の X 線によるものである。5.9 keV のピークの中央値が 1114 ADU であることより、ゲインが 5.3 eV/ch であることが分かった。また、5.9 keV のガウシアンの幅が 15.49 ADU r.m.s. であることより、5.9 keV のエネルギー分解能は FWHM で 193 eV であることが分かった。

表 4.5: Grade0 のスペクトルファイルのフィッティング結果および性能値

	chain0		chain2	
	MnKα	MnKβ	MnKα	MnKβ
中央値 [ADU]	1114	1229	1101	1215
標準偏差 [ADU r.m.s.]	15.49	15.29	15.23	14.73
G[eV/ADU]	5.30		5.36	
Δ E[eV]	193		192	

第5章　議論と今後の課題

本章では、CCD 評価システムの動作試験で得られた性能について考察するとともに、改善に向けた今後の課題について議論する。

3.1 節で述べたように、CCD 評価システムには、冷却性能や読み出しノイズ、暗電流などに関していくつかの要求がある。これらの要求値を、評価試験の結果得られた性能が満たしているかどうか、ひとつずつ見て行く。

冷却性能 パルスチューブ冷凍機とヒーターの組み合わせで、コールドプレートを-120 ℃に安定に冷却できた。また、実際に miniCCD からの暗電流（約 1 e^-/4pixel/4sec）を読み出しノイズ（約 7 e^- r.m.s.）に対して十分低くすることができたことから必要な冷却性能は満たしている。また、数時間にわたって温度制御できたことから、安定性も十分である。

システムの長時間の安定動作および４秒以下の CCD の撮像間隔 撮像時間を４秒以下にできることという目標に対しては、miniCCD を使って実際４秒間隔で連続して CCD からデータを取得できたことから、ひとまず目標は達成することができた。

ただし、miniCCD はピクセル数が、320 × 512 と少ないので、今後、この評価システムでピクセル数が多い CCD を使う場合には、必要に応じてピクセルデータの処理速度を向上できるように、対策が必要になる。いくつか律速段階になる箇所が考えられるが、たとえば、MIO 基板との SpW を経由した通信速度がある。必要となる読み出し速度と評価システムでの試験内容に対応して、適切な対応を考える必要があるが、たとえば、フレームデータをすべて計算機に送るのではなく、イベント抽出を行ってイベントデータのみを転送する、などの方法が考えられる。

システムの低雑音性 で述べたように各コンポーネンツ同士を繋ぎ合わせることにより、システムノイズが約 6 e^- r.m.s. である低雑音なシステムを完成させた。また、miniCCD 接続時の読み出しノイズは約 7 e^- r.m.s. と求められた。これは、10 e^- r.m.s. という要求値に対し十分低く、要求を達成している。

エネルギー分解能 4.3.3.2 節より、miniCCD に ^{55}Fe を照射して得られたエネルギー分解能は 193 eV であり、これは SXI の目標値 200 eV を満たしている。これより、CCD 評価システムが十分な性能を持っていることを示すことができた。[1]

[1]ただし、XIS

以上より、今回構築したCCD評価システムがすべての要求性能を満たしていることが確認できた。本システムはハード面では十分な性能を持っていることを本試験から示すことができたが、ソフト面ではいくつか問題を抱えている。たとえば、DACの設定値を必要なタイミングで変えることができない問題やシーケンサーが予期せずアボートしてしまう問題である。前者には模擬ソフト（sxiDRsim）の整備が、後者にはマイクロコードコンパイラあるいはMIOボードに実装されているUserFPGAの整備が不十分であることが原因であると考えられる。このため、今後は上記を含めCCD評価システムのソフトウェアの整備を進めていく。

第II部

2-layer CCD の開発

第6章　2-layer CCD の概念

6.1　開発する背景

CCD を含む X 線検出器は、X 線だけでなく荷電粒子にも高い感度を持っている。一般に観測天体からの X 線フラックスはエネルギーが高くなるほど小さくなるのに対し、荷電粒子による X 線 CCD カメラのバックグラウンドの強度は、ほとんどエネルギーに依らずフラットなスペクトルを示すことが知られている。そのため、高エネルギー側では相対的にバックグラウンドの割合が高くなり、検出器の感度を上げるにはバックグラウンドを効率良く除去することが極めて重要になる。

バックグラウンドの除去方法として良く使われるのは、反同時計数である。X線は光電効果により一点で吸収されるのに対し、荷電粒子はその飛跡に沿って電荷を作る。そこで、X線検出器の周囲を別の検出器（ガードカウンタ）で覆えば、X線検出器に到達する荷電粒子はガードカウンタを通過する確率が高いので、ガードカウンタと同時に検出されたシグナルを捨てることにすれば（反同時計数)、バックグラウンドを大きく減らすことができる。『ぎんが』衛星を始めとして、ガスカウンタを用いたX線検出器では、この手法が必ずと言って良いほど採用されて来た。

しかし、X線 CCD カメラのような蓄積型の検出器では、秒程度の時間分解能しかなく、反同時計数の手法はつかえない。そこで従来の X 線 CCD カメラでは、X 線や荷電粒子が作る電子雲の広がりを調べ、大きく広がった電子雲は荷電粒子により作られたとみなすことでバックグラウンドを除去してきた。空乏層中で光電吸収されたX線が作る電子雲は、せいぜい数ミクロンの広がりしか持たないのに対し、荷電粒子は必ず中性領域を通過するため、電荷が桁違いに大きく広がってしまう。これを利用して、グレード法というある種のイメージ解析により、荷電粒子によるバックグラウンドを除去して来た。

ところが、ASTRO-H で使用するような完全空乏型（背面照射型）の X 線 CCD は中性領域が存在しないため、荷電粒子が入射した場合でも電子雲が広がりにくく、電荷の広がりを利用した従来の方法では、バックグラウンドの除去効率が悪くなる可能性がある。

図 6.1、図 6.2 に、「すざく」衛星搭載の X 線 CCD カメラで、実際に宇宙空間で取得されたデータを示す。ここに写っている飛跡は、ほぼすべてが荷電粒子によるものである。背面照射型 CCD（完全空乏型 CCD）で取得された図 6.2 では、広がった電荷がほとんど見られないことが、このフレームイメージからもすぐわかる。実際、「すざく」の背面照射型 CCD では、バックグラウンドレベルが高いことが知られている。よって、X線 CCD カメラの感度向上には、従来のグレード法に加えて、より強力にバックグラウンドが除去できる新たな方法が必要である。

そこで、本研究では、荷電粒子のバックグランドの除去が可能な全く新しいタイプの X線 CCD カメラとして、2-layer CCD を検討する。

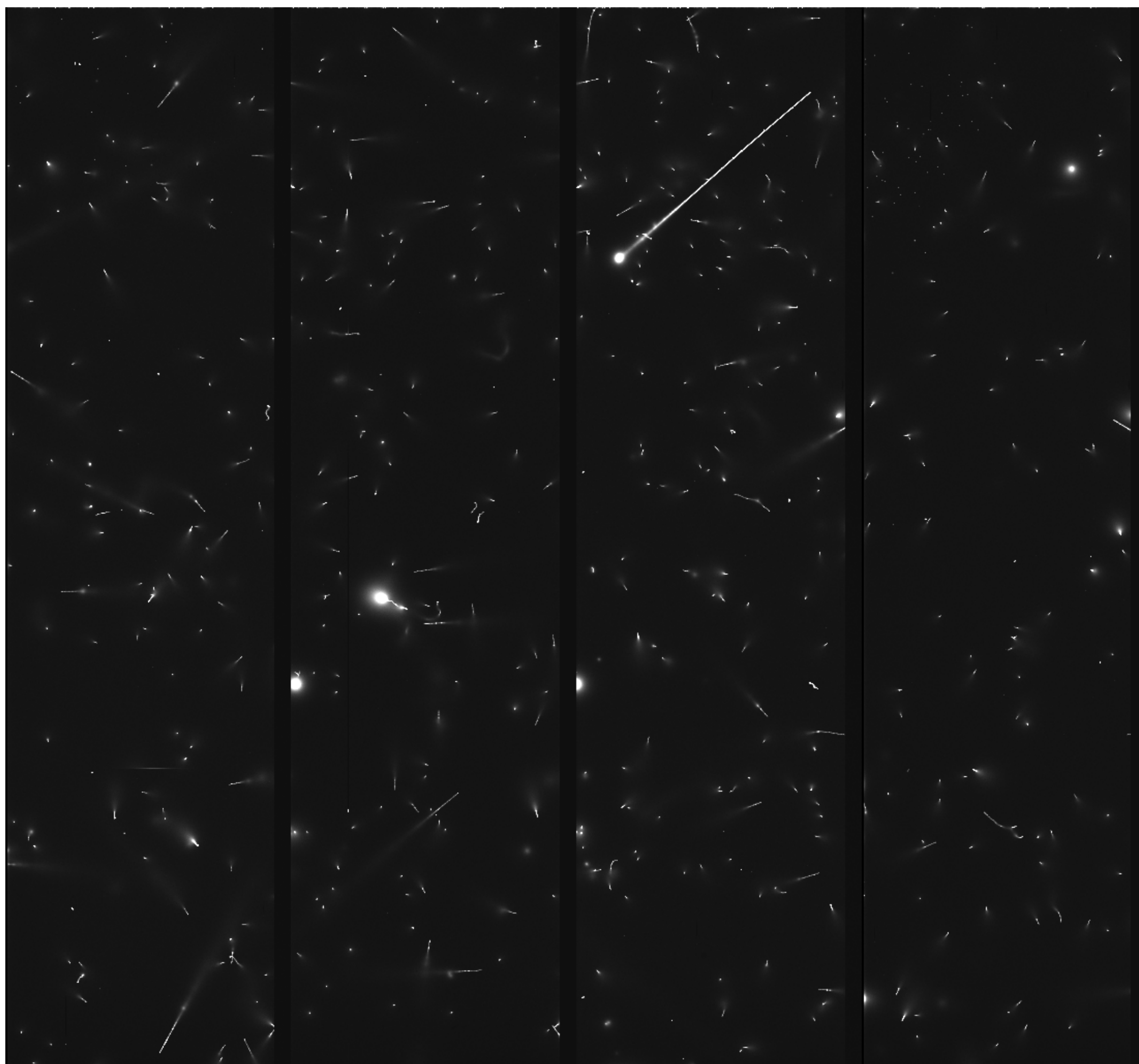


図 6.1: XIS2（FI-CCD）で荷電粒子が作るイベントのイメージ。FI-CCD は中性領域を持っているため、荷電粒子のイベントは大きく広がる。

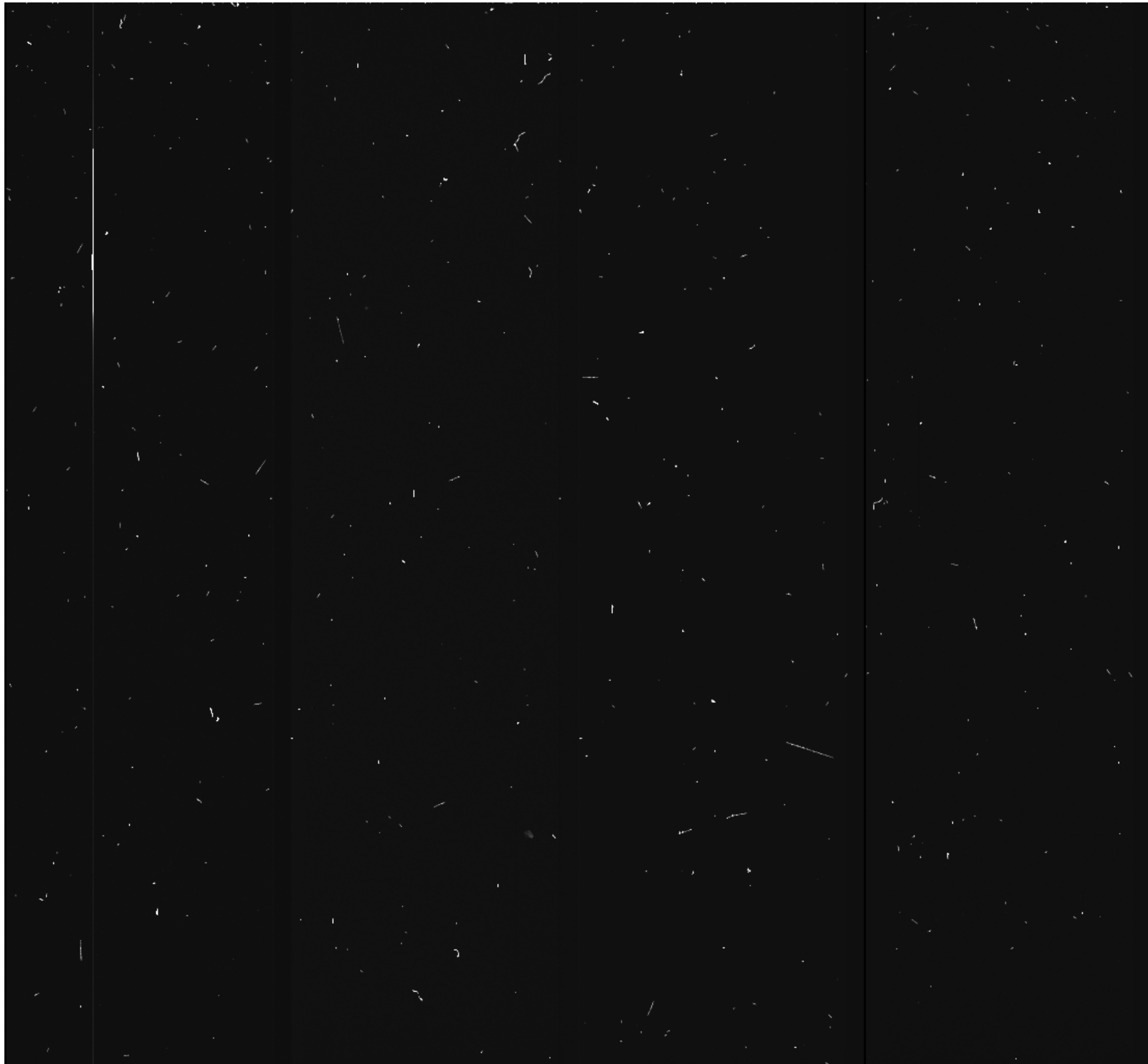


図 6.2: XIS1（BI-CCD）で荷電粒子が作るイベントのイメージ。BI-CCD（空乏層厚は 50-70μm）は中性領域を持たないため、荷電粒子のイベントはあまり大きく広がらない。

6.2　新しい X 線 CCD 素子の基本アイデア

反同時計数法によるバックグラウンド除去は、バックグラウンドとの対応を時間でつけている。したがって、X 線 CCD のように、本質的に積分型の検出器では時間分解能が悪く、適用することができない。一方、X 線 CCD は、ピクセルサイズで決まる高い位置分解能を持っている。そこで、時間ではなく、位置情報でバックグラウンドとの対応をつける方法が考えられる。

X 線 CCD の背面に、ガードカウンタとしての X 線 CCD をもうひとつ設置し、両方でシグナルが検出された場合には、バックグラウンドとしてその信号を除去するわけである。この「両方でシグナルが検出された」という判定に位置情報を使うわけである。別の言い方をすれば、荷電粒子の飛跡を三次元的に追跡することで、バックグラウンドの効率良い除去を行うといっても良い。

そこで本研究では、二枚の CCD を二層構造に配置し、荷電粒子の飛跡を追うことでバックグラウンドの除去効率を飛躍的に高めることを試みる。このような二層構造の CCD はこれまで作られたことがなく、上手く機能すれば X 線 CCD のバックグラウンドを効率良く除去できる画期的な方法となる可能性がある。

第7章　2-layer CCD の製作および試験

荷電粒子バックグラウンドの除去効率を高める新しいタイプの CCD 素子の製作およびコンセプト実証のために行った試験について述べる。

7.1　素子設計と実製作

実際の 2-layer CCD は、既存のシステムおよび素子をできるかぎり流用し、コンセプトを実証できるよう以下の点に留意して設計した。2-layer CCD の上下素子には性能評価試験で用いた既存の BI-CCD を二枚流用した。

- 上下素子で縦転送方向を揃える
  2-layer CCD はフルフレームトランスファーおよびフレームトランスファーでの動作を考えている。そこで、電荷転送時に荷電粒子が入射した際に入射位置が上下素子でずれないようにするため素子のパッケージ同士を背面（電極面と反対側）で貼り合わせて上下素子で縦転送方向を揃えることにした。
  ただし、縦転送方向が揃うことを優先したため、パッケージの制約から水平転送方向は上下素子で逆方向となっている。このため、電荷転送時に水平転送路に荷電粒子が入射した場合、上下素子で入射位置に大きなズレが生じる可能性がある。しかし、電荷の水平転送時間は数マイクロ秒であり露光時間（4 秒）に比べかなり短い時間となっているため、この影響はほぼ無視することができる。

- 出力以外の電極の共通化
  素子の電極は、構築した（1素子用）評価システムで駆動できるように出力以外の電極は上下素子で共通化するようにピン同士を接続した。また、照射側素子の出力ピンは、既存の（1素子用）ヘッド基板で二層同時に出力を得ることができるように冷却側素子の素子に未接続のピンに接続した。ピンの接続を楽にするため、上下素子のインタフェースとしてミニヘッド基板を製作し、利用した。ミニヘッド基板では出力信号・入力信号ともに信号処理は行っておらず、信号を素通しさせているだけである。

素子の製作は、静電破壊をしないよう上下素子の電極ピンをそれぞれ等電位に保つことを心掛けながら行った。図 7.1 完成した 2-layerCCD の写真をのせる。

このように作ったが、既存の BI-CCD を流用したため、いくつか問題点も残った。以下、問題点について示す。

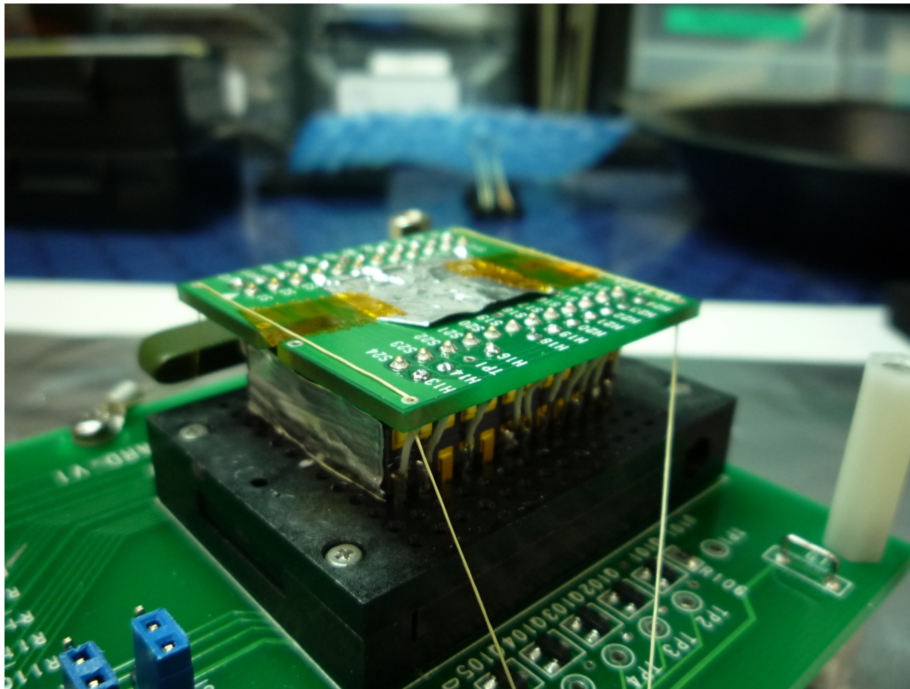


図 7.1: 2-layer ccd の完成図

- 素子間隔
  上下素子の間隔は、既存の BI-CCD がパッケージと一体化した構造となっているため、上下素子のパッケージ同士の干渉により素子間隔が 2mm 程度とピクセルサイズ（50um）に対しかなり広くなってしまった。そのため、荷電粒子の入射角度によっては上下素子で入射位置にランダムなズレが生じる可能性がある。

- 蓄積領域のズレ
  既存 BI-CCD の蓄積領域の画素は撮像領域の画素に比べピクセルサイズが少し小さく作られているため、蓄積領域は全体的に片側に寄った構造をとっている。そのため、撮像時に蓄積領域に入射したベータ線は上下素子で入射位置に 10 ピクセル程度の系統的なズレを持ってしまう。

- 貼り合わせによるズレ
  素子の貼り合わせに関してアライメント等は行っていないため、系統的なズレが生じている可能性がある。目視では上下素子間のズレは確認できなかったので、多く見積もったとしても配置的なズレは数ピクセル以内に抑えられていると思われる。

7.2 概念実証試験

2-layer CCD の基本概念である荷電粒子バックグラウンドの除去性能を実証するために、製作した 2-layer CCD を用い、冷却した素子に模擬バックグラウンドを照射したフレームイメージを取得する。

7.2.1 試験手法

冷却した素子に模擬バックグラウンドを照射したフレームイメージを取得するために、照射系の整備およびシステムのチューニングを行った。模擬バックグラウンドには、^{90}Sr 線源から照射される 0.5 MeV と 2.3 MeV のベータ線を使用した。使用したベータ線の強度は、2012 年度 9 月時点で 9.8 kBq である。この線源を選んだ背景は XIS での BI-CCD の X 線 Grade になるバックグラウンドの八割が電子入射によるものであったというシュミレーション結果から、ある程度大きなエネルギーを持って手頃に入射できる ^{90}Sr 線源を使った [11]。

7.2.1.1 照射系の概要

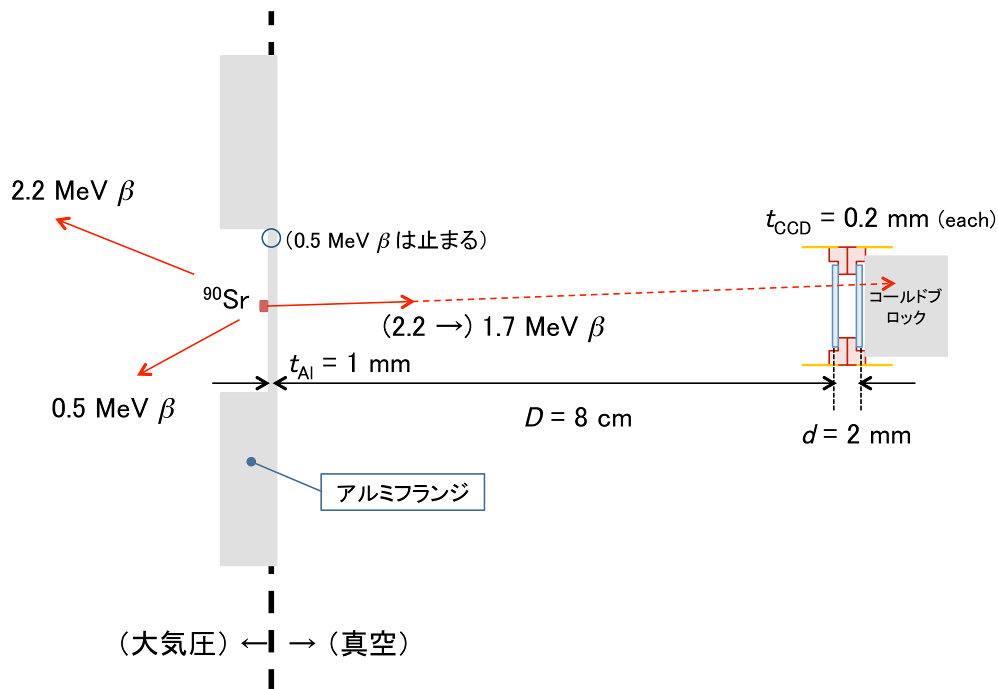


図 7.2: 照射系の概略図。2-layer CCD は真空槽内に配置され、既存のヘッド基板に実装されている 1 素子用の PGA ソケットに装着される。冷却側素子は、コールドブロックを介し冷却される。照射側素子は、冷却側素子のセラミックパッケージを介し冷却される。^{90}Sr 線源は真空中では使用できないので、真空槽外から照射する。そのため、2.2MeV のベータ線が degrade したものだけが 2-layer CCD に照射される。

図 7.2 に 2-layer CCD にベータ線を照射した照射系の概略図を示す。2-layer CCD は、 1 素子のときと同様にヘッド基板上のソケットに装着され、コールドブロックを介して冷却側素子を冷却する。照射側素子は、冷却側素子のセラミックパッケージおよびシリコングリスを介して冷却される。

^{90}Sr 線源は二枚のアルミニウム蒸着ポリエステルフィルムにアイソトープを固定した

構造をしているので、真空槽内でそのまま線源を使用するとフィルムが破れてしまう可能性がある。そのため、中央部分の溝に線源を入れることができるアルミフランジを新しく製作し、真空槽の外から照射することにした。中央部分はベータ線を照射するため厚さ 1 mm まで削られており、2.3 MeV のベータ線のみがアルミフランジを通過して 1.7 MeV 程度のベータ線となって素子に照射される。0.5 MeV のベータ線はアルミフランジで止まってしまうため素子には照射されない。

線源はアルミフランジをはさんで素子のちょうど真上にくるように配置されており、素子と線源の間の距離は約 80 mm ある。照射側素子と冷却側素子の間隔が約 2 mm あるので、線源および素子の配置から上下素子での荷電粒子バックグラウンドの入射位置にズレが生じる。入射位置のズレは、照射側素子への入射角度に依るが最大で 5 ピクセル程度生じることが予想される。

7.2.2 結果

本試験に入る前に、準備試験として、常温・常圧下で 2-layer CCD を駆動し、その出力信号波形をオシロスコープで直接観察して正常な信号波形と光に対する反応が得られることを確認した。2-layer CCD の駆動動作は、性能評価試験と同様のフルフレームトランスファおよび 2×2 ビニングである。また、既存の複数セグメント用ビデオボードを用いて 2-layer CCD からの出力信号を二層同時に読み出すことができるように既存のヘッド基板にパッチを施した。

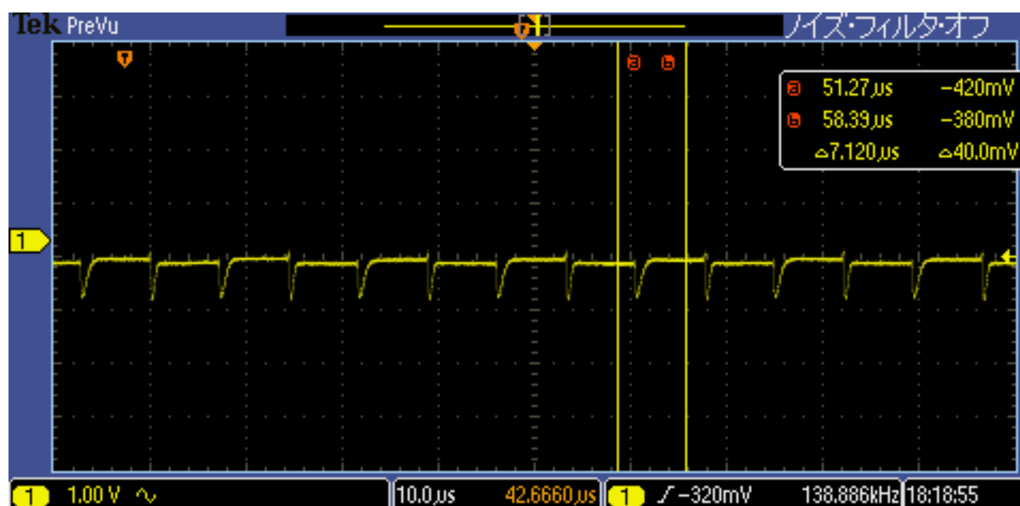


図 7.3: 照射側素子からの CCD 出力の波形。フローティング・レベルからシグナル・レベルに立ち上がる部分で正常な出力波形には見られないアンダーシュート（b 線の右側）が見える。アンダーシュートは 1 画素の読み出し周期と同じ 14.4μs 周期で生じている。しかし、シグナル・ レベルのサンプリングを行う前に定常電圧値に戻っているので、信号の読み出しには影響はない。

図 7.3 に冷却側素子および照射側素子の出力信号波形を示す。この図から分かる通り、冷却側素子側からは期待される正常な信号波形を得ることができたが、照射側素子からの信号波形には異常が見られた。異常な点とは、フローティング・レベルからシグナル・レベルに立ち上がる部分で見えるアンダーシュートのことである。しかし今回の場合は、シグナル・レベルのサンプリングを行う前に定常電圧値に戻っているので、信号の読み出しには影響がないと判断し対策を施さず進めた。

また、性能評価試験と同様に明撮像と暗撮像を行い、冷却側素子および照射側素子の光に対する反応をオシロスコープで観察した。これより、二層ともに明撮像においてのみ HUC 領域まで出力が飽和していることを確認した。これは光に反応した結果、大量に生じたキャリアが撮像領域全域をあふれて水平転送路まで侵入してきたことを示している。よって、二層ともに静電破壊などは起きておらず正常な状態であることが確認できた。

準備試験から 2-layer CCD が正常な状態であることが確認できたので、2-layer CCD の概念実証のための試験を行った。システムを連続運転させて、-120 ℃に冷却した素子にベータ線を照射したフレームイメージを取得した。

図 7.4 に得られたフレームイメージを示す。得られたフレームイメージには両層ともに電荷流れ等は見られないが、照射側素子のフレームイメージにおいて撮像領域と HOC 領域においてはっきりと波高値の差がみえている。これは照射側素子の冷却が不十分であったためであり、2-layer CCD の駆動および読み出しには問題はない。以上より、既存の CCD 評価システムを用いた 2-layer CCD の駆動および二層同時読み出しに成功したことが確認できた。

また、素子間のベータ線の入射位置の相関を見やすくするために、図 7.4 に飛跡に合わせコントラストを調整したフレームイメージを示す。この図から、両素子で分布はなんとなく似ているようにも見えるが、ベータ線毎にはっきりと対応を付けることができない。

図 7.4 でベータ線が入射した位置と考えられる場所を拡大したものを図 7.6 に示す。これより、ベータ線が入射した場所は、明るい画素が単独で存在しているのではなく、複数隣り合って集まっていることがわかる。

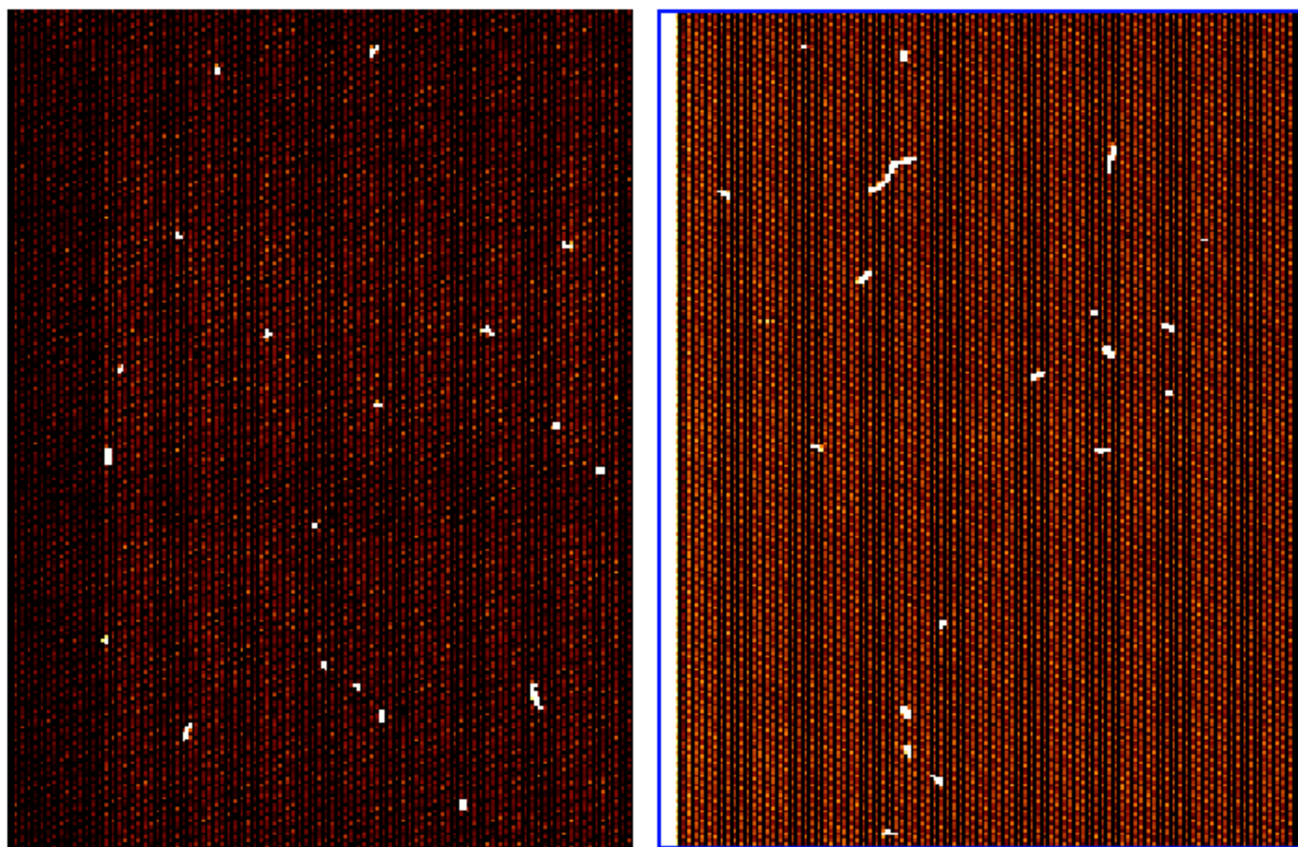


図 7.4: 冷却した 2-layer CCD にベータ線を照射したフレームイメージ。左側が照射側素子のフレームイメージ、右側が冷却側素子のフレームイメージである。二層ともにベータ線の入射位置と思われる明るい画素が見える。照射側素子のフレームイメージだけ HOC 領域（画面左側）と AP 領域（中央部分）の波高値の差がはっきり見えている。

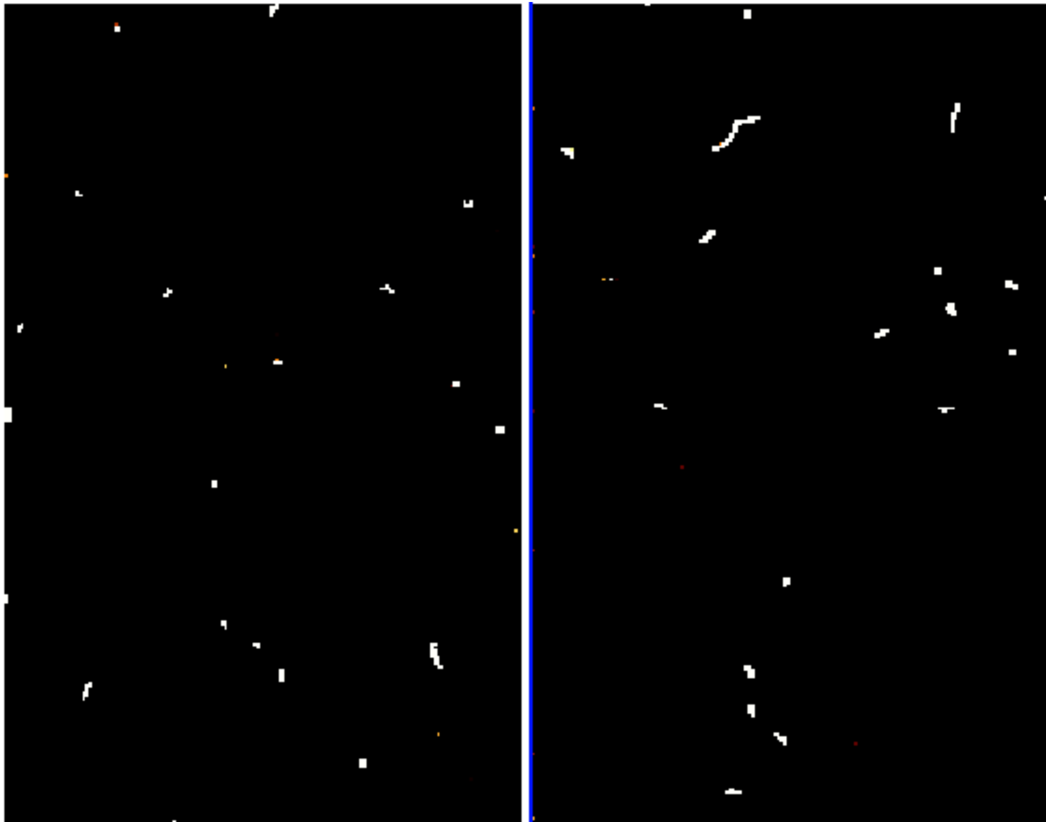


図 7.5: 冷却した 2-layer CCD にベータ線を照射したフレームイメージ。左側が照射側素子のフレームイメージ、右側が冷却側素子のフレームイメージである。AP 領域のみ切り取り、また、ベータ線の入射位置が分かりやすくなるようにコントラストを調整した。二層ともにベータ線の入射位置と思われる明るい画素が見えるが、照射側素子と冷却側素子で明るい画素の配置が大きく異なっていることがわかる。

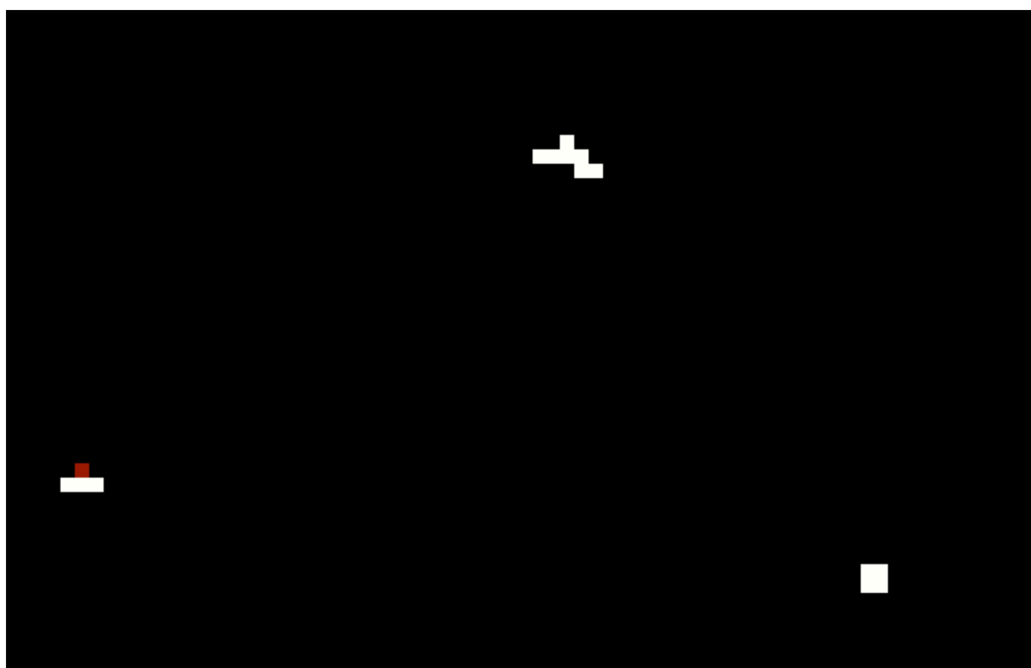


図 7.6: 図 7.5 でベータ線が入射したと思われる場所を拡大した図。ベータ線が入射した場所は、明るい画素が単独で存在しているのではなく、複数隣り合って集まっていることがわかる。

第8章　議論と今後の課題

前章の概念検証試験で、既存の CCD 評価システムにより 2-layer CCD の駆動と二層同時の画像データの取得に一応成功した。しかし、得られたフレームイメージを見るとベータ線による荷電粒子の入射を二層ともに確認することはできたが素子間でベータ線毎の対応をつけることはできず、2-layer CCD のコンセプトを実証することはできたが、まだ実用レベルには達成していないことが分かった。

今章では、素子間でベータ線毎に対応付けられなかった結果について議論し今後の研究に繋げていく。

図 8.1 に図 7.5 の撮像領域に照射側素子でのベータ線の入射位置から想定される冷却側素子でのベータ線入射領域範囲を示した図を示す。7.1 節で述べた貼り合わせによる系統的なズレは、データ処理によって除去することが可能であるが、今実験では 2-layer CCD に対しアライメントを行っていないため考えないこととする。また、蓄積領域のズレも、撮像領域のみのイベントを考えることで無視することにした。これより、上下素子のベータ線入射位置のズレを表す領域の半径は、7.2.1.1 節で述べた線源と素子の配置からくるランダムなズレからくる 5 ピクセルとした。

しかし、図 8.1 より上下素子のベータ線の入射位置は想定以上のズレがあることが分かる。これは、本試験では模擬バックグラウンドとして質量の軽いベータ線を使用したために素子内の物質の原子核のクーロン場により大きく散乱してしまったと考えられる。この結果、大きな素子間隔により上下素子で荷電粒子の入射位置に想定以上の大きなズレが生じてしまったと考えられる。また、散乱の間接的な証拠として、図 7.6 のようにベータ線のイメージが複数の画素にまたがっていることもあげられる。複数の画素にまたがった原因として、ベータ線が素子内で落とすエネルギーが画素のフルウェルを超えてブルーミングしてしまったことも考えられるが、ブルーミングは垂直方向に起きやすいことおよびビニング動作させていることから主原因はやはり素子内での散乱によるものであると考えられる。

以上より、今後の研究のため、まず今回の現象を定量的に理解する必要がある。そのためにモンテカルロ・シュミレーションを行い、ベータ線の散乱で上下素子での入射位置の大きなズレが説明できるかを検証する必要がある。

また、上下素子でベータ線毎にイベントを対応付けれるように、上下の素子間隔を小さくした新しい 2-layer CCD を製作する必要がある。これにより、下の素子が anti-co 素子として実用レベルの性能を発揮できるようになると期待される。

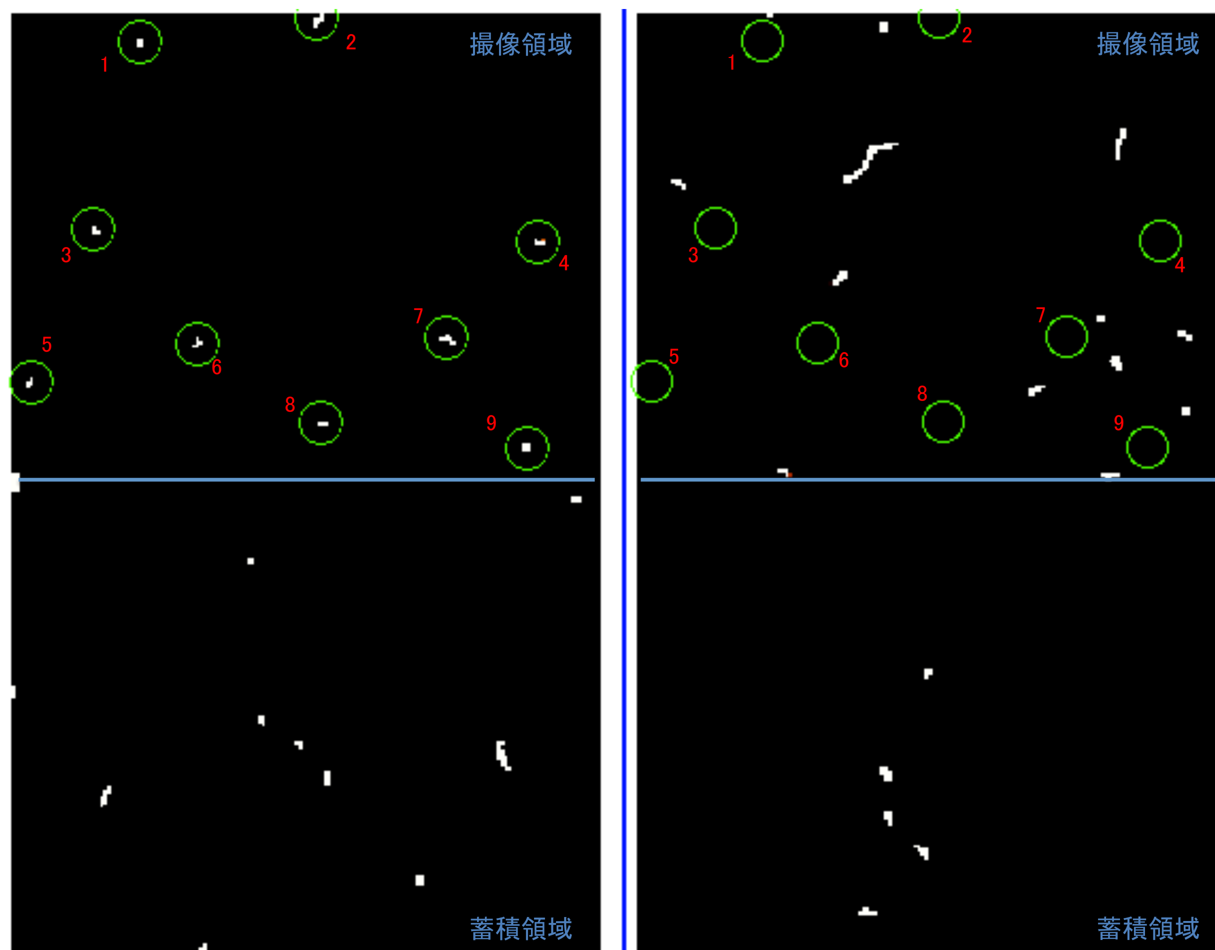


図 8.1: 図 7.5 の撮像領域に照射側素子でのベータ線の入射位置から想定される冷却側素子でのベータ線入射領域範囲を示した図。領域の半径は 7.2.1.1 節で述べた線源と素子の配置からくるランダムなズレ（5 ピクセル）としたが、冷却側素子のベータ線の入射位置に想定以上のズレがあることが分かる。

参考文献

[1] Giacconi, R. & Gursky, H. 1675, Space Science Reviews, 4,151.

[2] Btadt, H. V. D., Ohashi, T. & Pounds,K. A. 1992, ARA&A, 30, 391.

[3] 次期 X 線国際天文衛星 ASTRO-H HP
(http://astro-h.isas.jaxa.jp/index.html.ja)

[4] Oda, M. et al. 1971, ApJL, 166, L1

[5] XCOM: Photon Cross Sections Database
(http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html).

[6] Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions
(http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/contents.html).

[7] Glenn F. Knoll 著, 木村逸郎、阪井英次訳,
「放射線計測ハンドブック 第 3 版」, 日刊工業新聞社 (2001).

[8] 西村純 責任編集,
「宇宙放射線」, 実験物理学講座 25, 共立出版株式会社 (1986).

[9] 山崎文男 責任編集,
「放射線」, 実験物理学講座 26, 共立出版株式会社 (1973).

[10] High Energy Astrophysics Group at ISAS Japan
(http://www.astro.isas.jaxa.jp/).

[11] 狐塚　正樹 修士論文 「X 線 CCD 検出器の宇宙環境におけるバックグラウンドの起源の解明」(東京大学 2004)

[12] 中嶋大 ほか、 「CCD イメージセンサー高速処理用 ASIC MND02 取扱説明書」（2009）

[13] CCD エリアイメージセンサー S11745-1936（X）スペックシート
2012 年 4 月 浜松フォトニクス株式会社

謝辞

多くの方々にご指導・ご協力いただき、本論文を完成させることができました。ここに、感謝の気持ちを述べさせて頂きます。

指導教官である堂谷忠靖教授には、遅々として進まない実験・執筆作業の中、辛抱強く対応して頂きました。また、様々な業務を抱え多忙を極める中、本当に丁寧な添削やコメントを頂きました。本当にありがとうございました。

尾崎正伸助教には、本論文の研究テーマを与えて頂き、実験から本修論に至るまで多大なサポートをして頂きました。また、尾崎さんが教えて下さった研究計画の手法は自分にとって本当に大きな財産となりました。今後も実践していきたいと考えております。本当にありがとうございました。

JAXA 招聘職員の夏苅権さんには、就職活動や実験・論文が大変なときに温かい言葉をかけて頂き本当に嬉しかったですし、救われました。本当にありがとうございました。

D3 の藤永貴久さんには、CCD 実験のいろはを教えて頂きました。自分がこの研究を行うことができたのも、藤永さんが CCD 実験の基礎をたたき込んでくれたおかげであると思っております。日頃恥ずかしくきちんとお礼を言うことができませんでしたが、本当に感謝しております。ありがとうございました。

D3 の松田佳子さんには、席が近いこともありいろいろ話（ときどき愚痴）を聞いて頂きました。また、些細な質問でもいつも丁寧に教えて下さいました。本当にありがとうございました。

堂谷研究室の広津敏尚さん、M1 の近藤恵介くん・井澤正治くんにも本当にお世話になりました。みんなの陰ながらのサポートに助けられました。

宇宙研 X 線グループの同期とは、励まし合い、刺激を受け合いながら修士の二年間をともに歩んできました。特に、満田・山崎研の山本亮くんにはパソコン関係で困ったときによく助けて頂きました。ありがとうございました。

SXI チームの皆さまには、直接的、また間接的にお世話になりました。本研究においては、SXI の試作回路を使わさせて頂きました。この試作回路がなければ、本研究を行うことはできませんでした。また、実験で問題が生じたときに、メールで迅速に対応して頂きました。本当にありがとうございました。

その他、ここには書ききれない多くの方々の御助力と支えによって修士論文をまとめることができました。本当にありがとうございました。